4 Achsen im Fahrwerk

Die ursprüngliche Definition der Achse war die starre Querverbindung der beiden miteinander drehbar gelagerten Räder, um die Fahrstabilität sicherzustellen und die Montage zu vereinfachen. Über die Achse werden dann die Räder am Aufbau befestigt. Diese Definition gilt für alle Starr- und Halbstarrachsen, weil hier die Räder unmittelbar auf der Achse gelagert sind und sich mit ihr mitbewegen. Mit der Einführung der Einzelradaufhängung wurde diese unmittelbare Verbindung aufgegeben; das Rad wird auf einem Radträger drehbar gelagert und der Radträger, als Koppelglied einer kinematischen Kette, mit mehreren Lenkern mit der Achse verbunden. Es ist nun schwierig zu sagen, ob die Achse auch die Aufhängung und den Radträger beinhaltet oder die neuen Komponenten neben der Achse und Achsträger eine neue Baugruppe bilden (die die Amerikaner als *Corner* bezeichnen). In diesem Buch wurde sich für die zweite Version entschieden, weil die Starrachsen und damit die ursprüngliche Grundlage einer Definition für Achsen bei Pkws langsam an Bedeutung verlieren.
Laut Definition im Kapitel 1 (**Bild 1-2**) beinhaltet die Baugruppe Achse den Achsträger, die Lenkung, den Stabilisator und den Achsantrieb. Die anderen Fahrwerkmodule wie Radaufhängung samt Federung und Dämpfung sowie Bremse werden dem Rad, bzw. einer „Ecke“ des Fahrzeugs (Corner) zugeordnet. Für die Beschreibung der Achskonzepte ist es jedoch zweckmäßig, die Achse und Corner als eine Einheit zu sehen und als Achsmodul zu betrachten (**Bild 4-1**).
Aggregate- und Achsträgerlagerungen gehören ebenfalls zur Achse, werden jedoch im Kapitel 5 Fahrkomfort NVH ausführlich beschrieben. Reifen und Felgen, die am Bandende montiert werden, werden in diesem Kapitel nicht mitberücksichtigt (s. Abschnitt 3.9).
Jeder Pkw besitzt zwei Achsen, um den Radträger über die Radaufhängung mit dem Aufbau zu verbinden. Jede Achse hat in der Regel eine Stabilisatorstange, welche die beiden Räder miteinander verbindet, um das Wanken des Aufbaus in den Kurven zu reduzieren. Die Stabilisatorstange wird mit zwei Gummilagern am Aufbau bzw. Achsträger befestigt. An den Enden verbinden die Stabilenker (s. Abschnitt 3.5.2.4) den Stabilisator räumlich gelenkig mit dem Radträger (oder Radlenker / Stoßdämpfer).
Die modernen Pkw-Achsen werden vorab auf einem Achsträger (auch Hilfsrahmen oder Fahrschemel genannt, s. Abschnitt 3.7.7) montiert und bei der Endmontage mit zwei bis vier Schrauben am Aufbau befestigt. Diese Befestigung erfolgt meist indirekt über großvolumige Hilfsrahmenlager. Die Gummilager reduzieren die Übertragung der von der Fahrbahn kommenden Schwingungen und des Körperschalls auf den Fahrgastraum. Gleichzeitig ermöglichen sie durch größere Längselastizitäten die Längsfederung der Achse, um die Abrollhärte abzuschwächen.
Lenkgetriebe und Spurstangen (s. Abschnitt 3.4) sind Bestandteile der Vorderachse, weil diese die Vorderradführung mitbestimmen. Je nach Bauraumsituation, vor allem bedingt durch die Motor-/Getriebelage, wird das Lenkgetriebe auf dem Achsträger vor oder hinter der Radmitte befestigt. Auch gibt es Lenkgetriebebefestigung oberhalb von Motor/Getriebe mit Verschraubung an der Karosserie (z.B. Audi A4, A6, A8).
Die Anbindung der Lenkung an die Achse bzw. den Radträger sollte im Sinne einer exakten Radführung möglichst steif sein. Die Lenkgetriebe-Anbindung auf dem Achsträger statt dem Aufbau ist diesbezüglich und auch bezüglich der kürzeren Fertigungstoleranzkette zwischen Lenkung und Achsteilen einfacher zu beherrschen. Der Achsträger der Vorderachse dient häufig auch als Träger für Motor und Getriebe, d.h., die Motor-/Getriebelagerung befinden sich auf dem Achsträger. Weitere Lagerpunkte können auf zusätzlichen Karosseriequertraversen oder Karosserielängsträgern angeordnet sein.

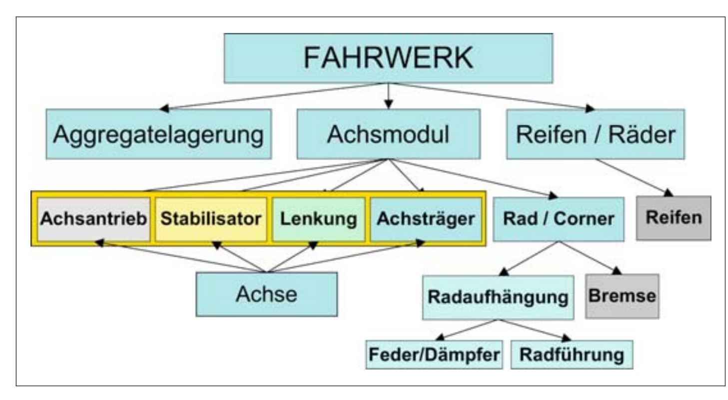


Bild 4-1:
Achsen und Radaufhängungen

Die Lageranordnung ist eng mit dem Fahrzeugkonzept verknüpft und prägt den Schwingungs- und Geräuschkomfort entscheidend. Stuckern und Brummfrequenzen des Motors lassen sich durch die Achsträgergummilager unterdrücken (Abschnitt 5.3).
Die Gewichte von Motor und Getriebe werden direkt über das Motorlager zum Achsträger und von da aus über Radaufhängung und Räder auf die Straße übertragen. Die Laufunruhe und Schwingungen werden dagegen über Achsträger und Karosserie zum Fahrzeuginnenraum weitergeleitet. Ein direkt am Aufbau befestigtes Antriebsaggregat könnte heute kaum den Komfortansprüchen der Insassen genügen.
Der an die Karosserie verschraubte Achsträger bietet zudem eine erhebliche Erleichterung der Montage des Fahrzeugs. Die Achse mit Corner-Modulen kann vormontiert ans Band geliefert werden, für die Vorderachse gegebenenfalls mit komplettem Antrieb.
Die Vorteile dieser Vormontagefähigkeit wurde bereits 1934 von Opel genutzt. Das Antriebsaggregat wurde auf die vormontierte Vorderachse geschraubt („Verlobung“). Anschließend wurde die Achse mit dem Aggregat im Montageband in die Karosserie gehoben und mit dieser verschraubt („Hochzeit“). Damit war eine effiziente Montagefolge gefunden, die dann bald von allen anderen Automobilherstellern übernommen wurde.
Bei den Fahrzeugkonzepten mit Heck- und Mittelmotor wirkt die Hinterachse gleichzeitig als Aggregateträger für den Antrieb. Auch das Hinterachsgetriebe wird, wie die Motor-/Getriebeeinheit der Vorderachse, über großvolumige Gummilager mit der Achse verbunden um das NVH Verhalten zu verbessern.
Der bewegliche Radträger wird durch die Radaufhängungsteile (Lenker, Spurstangen, Federbein) mit der nicht beweglichen Achse verbunden. Die Verbindungspunkte, die die Achskinematik bestimmen, werden als Gelenkpunkte (Hardpoints) definiert und bilden die Grundlage für jede Radaufhängung.
Die Radaufhängung sollte an jeder Seite der Achse genau symmetrisch zur Fahrzeugmittellinie angeordnet sein. Bei Unsymmetrien kann der Geradeauslauf sich verschlechtern und das Fahrverhalten bei Links- und Rechtskurven unterschiedlich sein. Bauraumbedingt kann es allerdings, wenn auch sehr selten, Zwänge geben, beispielsweise die x-Koordinaten links und rechts unterschiedlich zu wählen.
Das Rad einer Hinterradaufhängung hat relativ zum Aufbau nur einen Freiheitsgrad in z-Richtung zum Federn. Das Rad einer Vorderradaufhängung besitzt einen zweiten Freiheitsgrad (um die Lenkachse) zum Lenken der Räder. Die Starrachsen haben als eine Einheit immer zwei Freiheitsgrade: einen translatorischen und einen rotatorischen, weil das rechte und linke Rad fest miteinander über die Achse verbunden sind. Deshalb beeinflussen die beiden Räder einer Starrachse sich gegenseitig.

Weil die Starrachsen und Einzelradaufhängungen sich grundsätzlich voneinander unterscheiden, fehlt eine klare Begriffbestimmung zwischen Achse und Radaufhängung. Eine eindeutige, logische Systematik aller Achskonzepte ist ebenfalls schwierig, weil mehrere Unterscheidungsmerkmale sich überschneiden.
Die oberste Ebene der Systematik lässt sich jedoch durch die grundsätzliche Unterscheidung zweier Achskonzepte eindeutig festlegen:

- Starrachsen (abhängige Radführung),
- Einzelradaufhängungen (unabhängige Führung).

Zwischen den beiden Grundtypen liegt eine dritte:

- Halbstarrachsen (Verbundlenkerachsen).

Tabelle 4-1 zeigt die übergeordneten Merkmale einzelner Konzepte und deren Gegenüberstellung.

Tabelle 4-1: Übergeordnete Auswahlkriterien für Achskonzepte [1]

ACHSTYPEN	ACHSE		RADAUFHÄNGUNG		
MERKMALE	Starr	Halbstarr	eben	sphärisch	räumlich
Auslegungspotential	-	0	0	+	++
Längsfederung	-	-	0	+	++
Herstellkosten	+	+	0	-	--
Raumausnutzung	--	0	0	0	+
Gesamtgewicht	-	+	0	+	+
Robustheit	++	0	0	-	-
Fahrverhalten	-	0	0	+	++
Fahrkomfort	--	0	0	+	++

Als nächste Unterscheidungsebene nach Starrachse, Halbstarrachse und Einzelradführung können – wie Matschinsky vorschlägt – die kinematischen Merkmale berücksichtigt werden wie ebene, sphärische, räumliche Getriebe. Es ist aber nicht durchgängig anwendbar. Noch sinnvoller eignen sich die Lenker- und Gelenkarten (2-Punkt, 3-Punkt, 4-Punkt, Drehschub) als Unterscheidungsebene. Bei den Starrachsen lässt sich dieses durch Blattfedern erweitern, weil diese auch als Lenker dienen. Damit wären die zwei wichtigsten Unterscheidungsebenen festgelegt (**Tabelle 4-2**).
Die dritte Unterscheidungsebene könnte die Anzahl der Lenker sein, bei starren Achsen entsprechend der Gesamtlenkerzahl, bei Einzelradaufhängungen nur die Lenkeranzahl einer Radaufhängung.
Die vierte Ebene wird über die Orientierung der Lenker (längs, quer bzw. pendelnd, schräg, räumlich) gebildet. Schließlich lassen sich in einer fünften Ebene die unterschiedlichen Ausführungsvarianten als unterstes Unterscheidungsmerkmal berücksichtigen.
Damit ergeben sich 18 unterschiedliche Achs- und Aufhängungsarten.

MERKMALE	STARR-ACHSEN					HALB-STARR			EINZELRAD-AUFHÄNGUNGEN									
Gelenkart	Blattfeder	Dreh-gelenk + Schrauben-feder				Dreh-gelenk			Dreh-gelenk							Drehschub gelenk + Drehgelenk		
Lenkeranzahl	1	2			1	1			1			2	3	4	5	3	4	
Lenkerlage	Längs	Längs			Schräg	Längs			Längs	Schräg	Quer	Schräg	Quer	Raum	Raum	Quer	Quer	Raum
Zusatzmerkmale	Federverband	Dreieck	Panhard	Wattgestänge	Deichsel	Torsion	Koppel	Verbund	Gerade	Dreieck	Gerade	Trapez	DQ-Lenker	DQLaufgelöst	Raum	3-Punkt	Federbein	Dämpferbein
Lf.-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18

Tabelle 4-2:
Systematische Aufteilung der Achs- und Aufhängungskonzepte

In den Abschnitten 4.1, 4.2 und 4.3 werden alle gängigen Achsen und Aufhängungen gemäß dieser Aufteilung näher erläutert und deren Vor- und Nachteile sowie aktuelle Einsatzfälle beschrieben. Außerdem wird für jede Gattung ein Eigenschaftsprofil in Form eines Spider-Diagramms dargestellt (wie im **Bild 4-3**), das alle wichtigen Anforderungen an die Achsen beinhaltet [2].
In den Abschnitten 4.4 und 4.5 werden die Einzelradaufhängung, die sich besonders als Vorder- oder Hinterachse eignen, zusätzlich beschrieben. Die restlichen Abschnitte behandeln das Gesamtfahrwerk und zukünftige Entwicklungen

4.1 Starrachsen

Wenn die beiden Räder über einen quer liegenden Achskörper fest miteinander verbunden sind und sich dadurch gegenseitig beeinflussen, spricht man von Starrachsen (*Solid Axle*) oder von abhängiger Radführung. Dieses Konzept wurde ursprünglich von den Kutschen übernommen. Heute werden Starrachsen bei Pkws und SUVs als Vorderachse nur vereinzelt eingesetzt, um die beste Geländegängigkeit zu erreichen (z.B. beim Jeep Rubicon, Baujahr 2007, **Bild 4-2**). Sie werden häufiger als angetriebene Hinterachse bei schweren Fahrzeugen (SUVs, Transporter, Light Trucks) mit geringem Komfortanspruch verwendet.

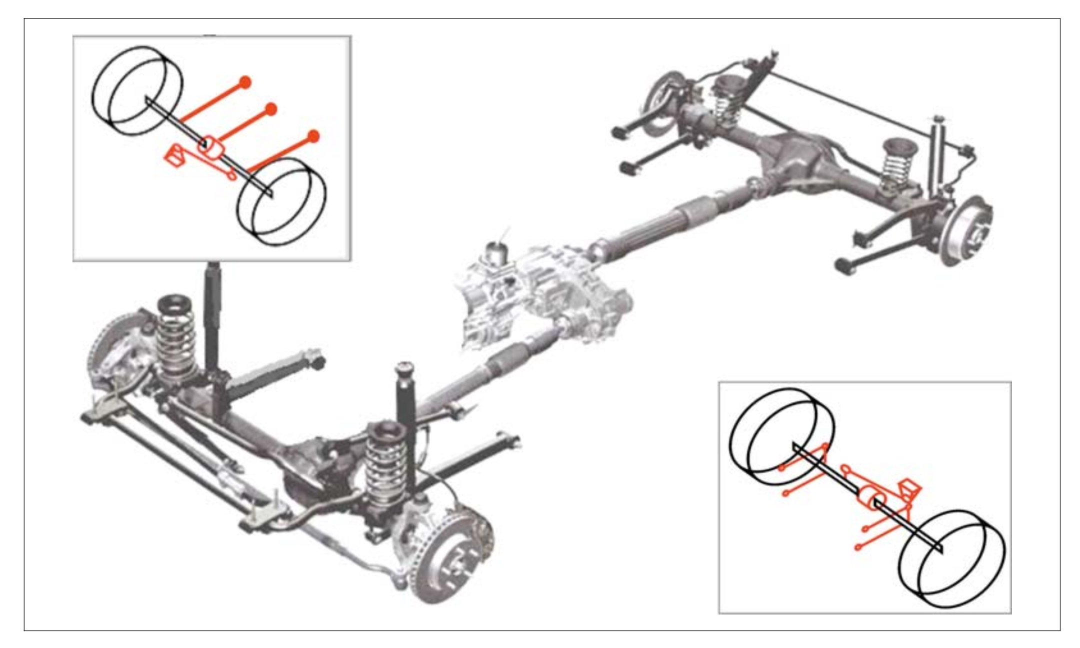


Bild 4-2: Allradangetriebenes Geländefahrzeug mit Starrachsen vorne und hinten (DC Jeep Rubicon, Bj. 2007)

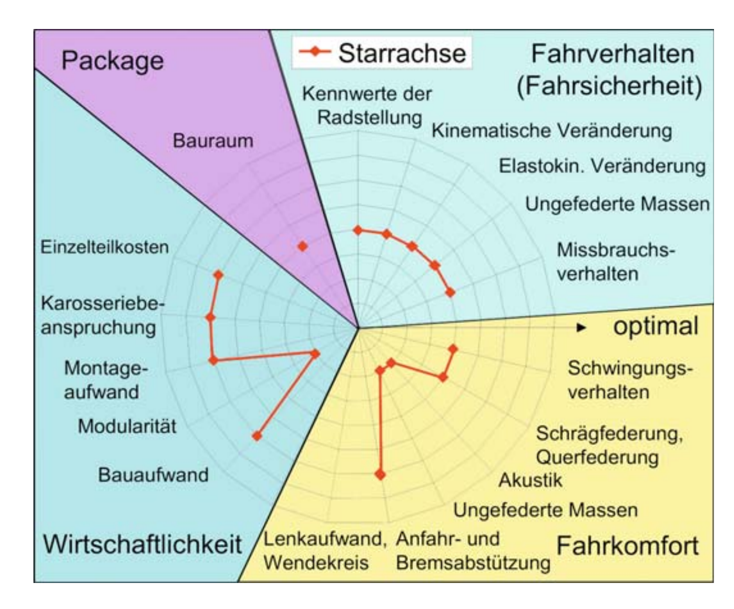


Bild 4-3: Eigenschaftsprofil für die Starrachsen [2]

Eigenschaften der Starrachsen sind (**Bild 4-3**):

- Einfachheit, Wirtschaftlichkeit, kostengünstige Integration der Hinterachsdifferenziale (Seitenwellen ohne Gelenk) im Achskörper,
- flache Bauweise → breite Ladefläche bei nicht angetriebener Achse,
- Robustheit, hohe Belastbarkeit,
- hohes Wankzentrum,
- identische Radstellung an beiden Rädern beim Federn (beide Räder haben stets dieselbe Spur und Sturz),
- hohe Verschränkungsfähigkeit der Achse im Gelände,
- große ungefederte Masse (Gesamtachse federt mit), bei angetriebenen Achsen doppelt so groß wie bei einer Einzelradaufhängung,
- gegenseitige Beeinflussung der Räder (Trampeln, reduzierte Anfederwilligkeit des Einzelrades) bei einseitiger Fahrbahnunebenheit,
- Vorspur und Sturz können nicht gezielt über anliegende Radkräfte (Elastokinematik) oder Einfederbewegung und damit fahrsituationsabhängig beeinflusst werden,
- notwendige, massive und relativ zum Aufbau bewegliche Querverbindung (Achskörper), mit viel Raumanspruch.

Die nicht angetriebenen Starrachsen haben gegenüber den angetriebenen Achsen geringere ungefederte Massen wegen fehlendem Differenzial und Seitenwellen und dem leichteren Achsprofil zwischen den Radachsen, dass u.a. durch eine niedrigere Positionierung hin zur Kraftebene schlanker gewählt werden kann (**Bild 4-4**). Nicht angetriebene Starrachsen werden häufig mit einem statisch negativen Radsturz und einer Vorspur versehen, um das Seitenführungspotenzial zu verbessern.

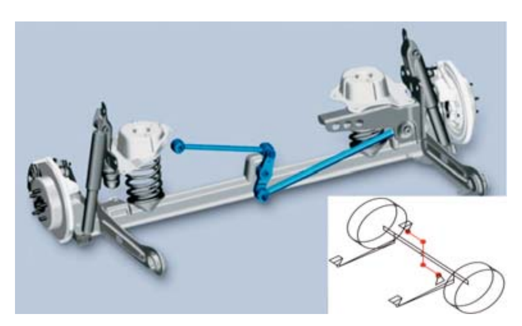


Bild 4-4: Nicht angetriebene Starrachse (Chrysler PT Cruiser, Hinterachse mit Wattgestänge, Bj. 1997)

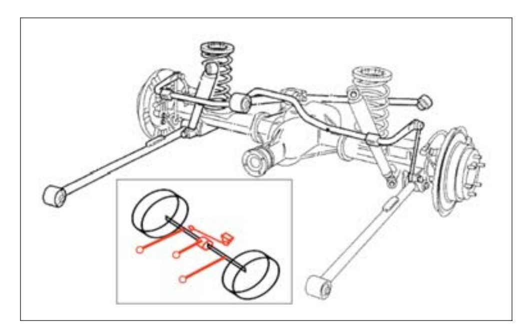


Bild 4-5: Angetriebene Starrachse mit Panhardstab und drei Längslenkern (Hinterachse Opel Frontera, Bj. 1995)

Bei angetriebenen Starrachsen ist das Differenzial mit dem Antriebsritzel und dem Zahnkranzrad entweder im Achsgehäuse integriert (konventionelle Ausführung **Bild 4-5**) oder das Differenzial wird getrennt und am Aufbau befestigt. Die erste Variante ist für schwere Fahrzeuge geeignet. Die zweite, die De-Dion-Achse, die eine deutlich geringere ungefederte Masse hat, wird eher für Pkw eingesetzt.

4.1.1 De-Dion-Achse: angetriebene Starrachse

Schon in den 30er Jahren hat der französische Autobauer de Dion die Nachteile der hohen ungefederten Massen verringert, indem er das Hinterachsgetriebe nicht an der Achse, sondern am Aufbau befestigt hat. Diese, bei den sportlichen Fahrzeugen lange Zeit bevorzugte angetriebene Starrachsenart, wurde erst mit dem Aufkommen der Einzelradaufhängung aufgegeben. Im Jahre 1996, als Smart eine ganz neue Autogattung für den Nahverkehr konzipierte, war es notwendig, den Antrieb sehr kompakt auf die Hinterachse zu setzen. Damit war die De-Dion-Ausführung in Verbindung mit einer Deichselachse wieder interessant, weil hier nicht nur das Getriebe, sondern das ganze Antriebsaggregat separiert werden konnte (**Bild 4-6**).



Bild 4-6: De-Dion-Achse mit Deichsel, Oberrahmen ist der Aggregateträger (Hinterachse DC Smart, Bj. 1998)

4.1.2 Starrachsen mit Längsblattfederführung

Die Federung bei Starrachsen wird meist über Längsblattfedern realisiert. Je nach Ausführung kann die Blattfeder dabei die Führung der Achse vollständig oder teilweise übernehmen. Häufig werden Lenker zur Aufnahme von Quer- oder Längskräften hinzugefügt. Die Blattfedern haben zwar Vorteile bezüglich Bauraum durch die flache Anordnung und bezüglich Karosseriekrafteinleitung durch die niedrige Punktbelastung (zwei voneinander weit entfernte Abstützpunkte). Sie sind aber schwer, haben hohe Reibung, zeigen S-Schlagneigung bei Lastwechselreaktionen und können daher die heutigen Komfortanforderungen nicht erfüllen (**Bild 4-7**).

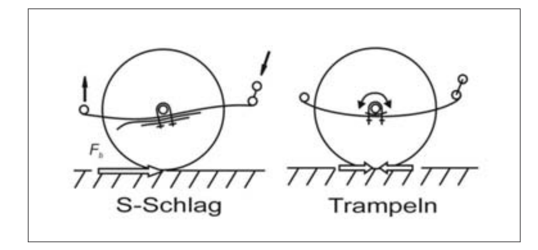


Bild 4-7: Die Nachteile der Blattfederführung

Auch einteilig hergestellte moderne Hightech-Blattfedern aus Kompositwerkstoffen, die leicht sind und sehr geringe Reibung haben, konnten sich nicht durchsetzen, weil nach wie vor die Radführung über eine Blattfeder kinematische Defizite aufweist.
Eine sehr bekannte und immer noch bei SUVs und Light Trucks eingesetzte angetriebene Hinterachse mit elliptischen Blattfedern [3], ist die „Hotchkiss-Achse“ (**Bild 4-8**). Sie besitzt keinen Lenker; Blattfedenr übernehmen die Längs- und Querführung.

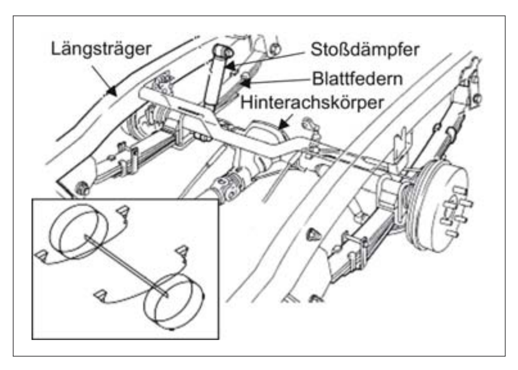


Bild 4-8: Angetriebene Starrachse mit elliptischen Blattfedern (Hinterachse Opel Campo, Bj. 1995)

Moderne Kleintransporter, die aus Kostengründen die Plattform der Serien-Pkws teilen, haben häufig hinten Starrachsen mit Blattfederführung, weil diese höher belastbar sind als Mittelklasse Pkw-Hinterachsen. Beispiele sind VW Caddy, Fiat Doblo oder Opel Campo (**Bild 4-9**). Es ist sicherlich das einfachste und kostengünstigste angetriebene Achskonzept, weil es keine Lenker benötigt. Allerdings bietet es kaum Spielraum für weitere Optimierungen, denn mehr Komfort durch weichere und damit längere Blattfedern führt zur Verschlechterung der Seitenführung und erhöht die S-Schlagneigung.

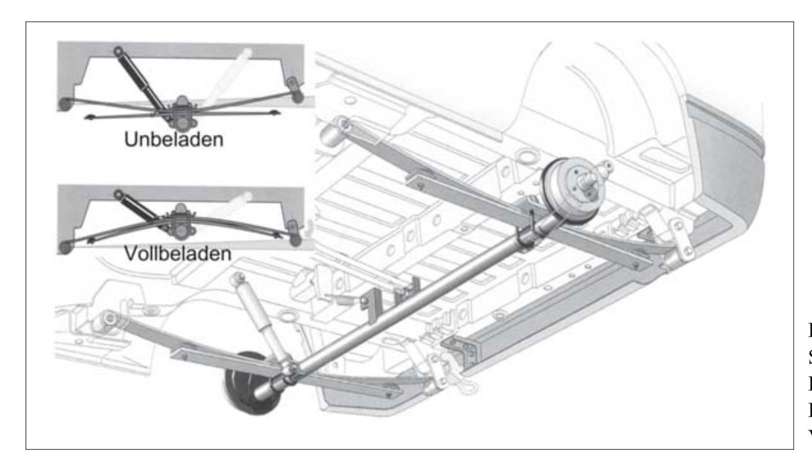


Bild 4-9:
Starre Hinterachse eines Leichttransporters mit Blattfedern (Hinterachse VW Caddy 2, Bj. 1994)

4.1.3 Starrachsen mit Längs- und Querlenker

Die Führung einer Starrachse muss eine vertikale Translation und eine Rotation um die Fahrzeuglängsachse zulassen. Der Achskörper wird deshalb mindestens mittels eines Kugelgelenks und eines Lenkers mit dem Aufbau verbunden. Die Lösungen sind Deichsel (oder Schubkugelachse [4]) mit Panhardstab oder mit Scherenführung oder Wattgestänge (**Bild 4-10**). Die Federung übernehmen hier die reibungsfreien und leichten Schraubenfedern, die jedoch zur Achsführung nichts beitragen können. Der Panhardstab bzw. die alternativen Gestänge übernehmen die Übertragung der Seitenkräfte. Während der Panhardstab einen seitlichen Versatz des Aufbaus beim Ein- und Ausfedern verursacht, führt das Wattgestänge die Achse ohne Querbewegung. Für die mittelbare Verbindung des Achskörpers über den Lenker steht die Kombination eines Dreieckslenkers mit zwei Längslenkern zur Verfügung. Eine immer noch aktuelle starre Hinterachse mit Schraubenfedern und Längslenkern ist die Ford-Mustang-Achse (**Bild 4-11**).



Bild 4-11: Starre Hinterachse von Ford Mustang

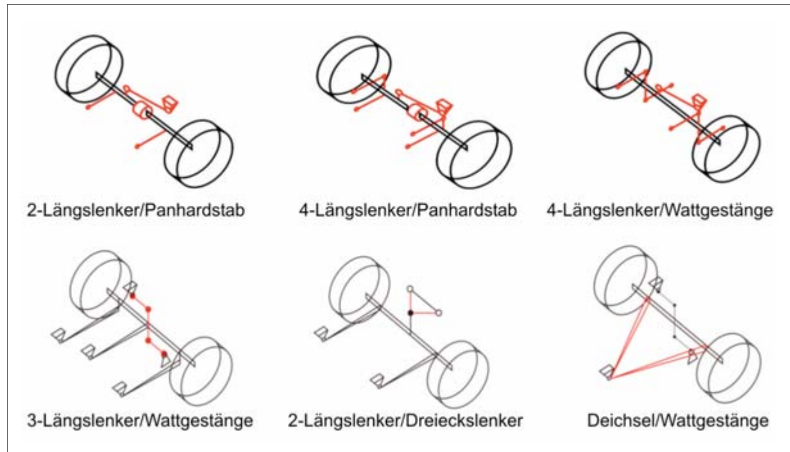


Bild 4-10:
Ausführungsvarianten der Starrachsen

Bis vor ca. 30 Jahren war bei Ford die **Vierlenker-Starrachse** (**Bild 4-12**) als angetriebene Hinterachse mit Schraubenfedern [3] weit verbreitet. Der Achskörper mit integriertem Differenzial wird durch zwei Längslenker unten und zwei Schräglenker oben am Aufbau befestigt. Die Brems- und Antriebsmomente werden über das Kräftepaar im jeweils oberen und unteren Lenker aufgenommen, der geringe Abstand der Lenker verursacht jedoch relativ große Kräfte. Die Schräglenker übernehmen die Querführung der Achse.

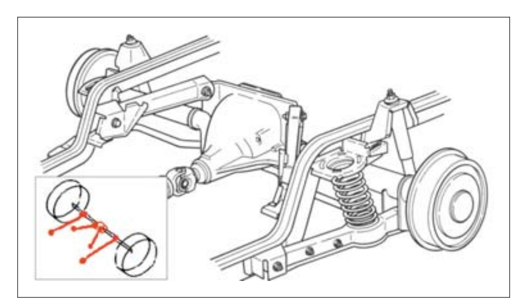


Bild 4-12: 4-Lenker Starrachse (Hinterachse, Ford Taunus, Baujahr 1970)

Die geometrische Anordnung der Lenker erlaubt eine gezielte Einflussnahme auf die kinematischen Eigenschaften, wie Wankpolfestlegung, Brems- und Anfahrnickausgleich und Vorspurverhalten.
Bei Starrachsen mit Führung durch Längslenker erfolgt bei einseitigem Einfedern eine Lenkbewegung der Achse, und dies umso stärker, je näher der Längspol an der Achse liegt (**Bild 4-13**). Dieser Effekt bewirkt einen unruhigen Geradeauslauf beim Befahren unebener Fahrbahnen.

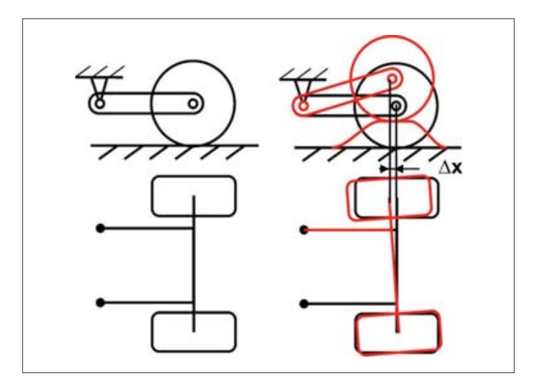


Bild 4-13: Lenkverhalten der Starrachsen bei einseitigen Bodenunebenheiten

Die sich auf den unteren Längslenkern abstützenden Schraubenfedern verbessern den Fahrkomfort. Durch die kinematische Optimierung der Anbindungspunkte der 4-Lenker lassen sich deutliche Verbesserungen in der Wankpolfestlegung, im Brems- und Anfahrnickverhalten und in der Wanklenkeigenschaft erreichen. In vereinfachten Fällen können die beiden oberen Stablenker durch einen Dreipunktlenker in A-Form ersetzt werden. Die Seitenführung wird häufig auch durch einen Panhardstab oder Wattgestänge übernommen.

4.1.4 Starrachsen mit Zentralgelenk- und Querlenkerführung (Deichselachse)

Eine effiziente Art der Anbindung einer Starrachse an den Aufbau ist die Deichselachse. Hierbei wird die Achse ähnlich einer Deichsel eines Anhängers vorne über ein Kugelgelenk oder ein Gummilager mit dem Aufbau verbunden. Eine möglichst hohe Anordnung des Lagers ergibt einen verbesserten Brems- und Anfahrnickausgleich.
Die Querführung übernimmt ein zusätzliches Gestänge. Um Lenkbewegungen beim Einfedern zu vermeiden, ist eine vertikale Geradführung bei dieser Achsausführung wichtig. Deshalb kommt ein Scherenprinzip bzw. Wattgestänge zum Einsatz. Dennoch treten auch bei diesem Konzept beim einseitigen Einfedern leichte Lenkbewegungen auf, wie es bei den Starrachsen mit Längslenkern vorkommt.
Die Räder bewegen sich immer parallel, mit sehr geringer Sturzänderung – solange beide Räder parallel federn. Federt nur ein Rad, verschieben sich beide Räder seitlich um ca. 25% des Federwegs und verursachen eine Lenkwirkung, die zur Stabilisierung des Fahrzeugs beiträgt.
Die neue A- und B-Klasse von Mercedes haben als Hinterachse eine Deichselachse. Das Wattgestänge zur Querführung ist liegend angeordnet, welches in der Fahrzeugmitte am Aufbau gelagert ist und beide Enden der Radträger miteinander verbindet (**Bild 4-14**).

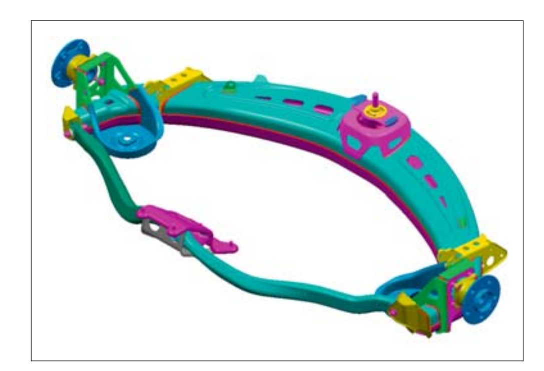


Bild 4-14: Mercedes A- und B-Klasse, Hinterachse

4.2 Halbstarrachsen

Halbstarrachsen (*Semi Solid Axle*) haben wie die Starrachsen eine mechanische Kopplung der beiden Räder. Während bei Starrachsen jegliche Relativbewegung zwischen den Rädern durch den Achskörper unterbunden ist, sind bei den Halbstarrachsen durch eine gezielte elastische Verformung des Verbindungselements Relativbewegungen möglich.

4.2.1 Verbundlenkerachsen

Die Verbundlenkerachse (*Twist Beam*) vereinigt einige Eigenschaften von Starrachse und Einzelradführung; einerseits von der Starrachse bekannte geringe Spur-, Sturz- und Vorspuränderungen bei symmetrischer Radfederung, anderseits einen günstigen Radsturz und merkliche Wankzentrumshöhe sowie ein ausgeprägtes kinematisches Eigenlenkverhalten bei asymmetrischer Radfederung [4], wie es die Einzelradführung ermöglicht.
Die beiden Radträger sind auf den biege- und torsionssteifen Längslenkern befestigt, die wiederum in Querrichtung mit einem Träger fest miteinander verbunden sind. Während die Längskräfte allein von den steifen Längslenkern aufgenommen werden, sind Querkräfte und Sturzmomente durch die versteifende Wirkung der Quertraverse abzufangen. Hierzu ist das Profil biegesteif auszuführen. Gleichzeitig ist es torsionsweich auszulegen, um neben der Funktion einer Stabilisatorstange auch das eingeschränkte unabhängige Einfedern der beiden Räder zu ermöglichen. Als Querverbindung werden neben T-Profile heute bevorzugt V- oder U-Profile eingesetzt, weil diese in der Betriebsfestigkeit der Schweißnähte zu den Längslenkern, dem T-Profil überlegen sind. Die beste Querverbindung ist jedoch ein Rohrprofil, dessen Querschnitt in eine C-Form zugedrückt ist. Damit sinkt die Torsionsrate drastisch und es lassen sich trotzdem ausreichend lange Schweißnähte an den Enden anbringen, die für eine lange Betriebsdauer geeignet sind.
Entscheidend für die kinematischen Eigenschaften der Achse ist die Lage des Schubmittelpunkts des Profils, denn hierüber definiert sich zusammen mit der Geometrie die Vorspurkurve bei wechselseitigem Einfedern und somit bei Kurvenfahrt.
Die Halbstarrachse wurde zuerst 1974 beim VW Golf und Scirocco als Verbundlenker und kurz danach beim Audi 50 und VW Polo als Koppellenkerachse eingeführt.
Mit dieser Anordnung entstand ein sehr einfaches, wartungsfreies und Raum sparendes Achskonzept, das keinen Achsträger benötigt. Die Verbundlenkerachsen sind für angetriebene Hinterachsen nicht geeignet, denn u.a. ist eine Kröpfung des Verbindungsprofils nicht sinnvoll darstellbar (**Bild 4-15**).

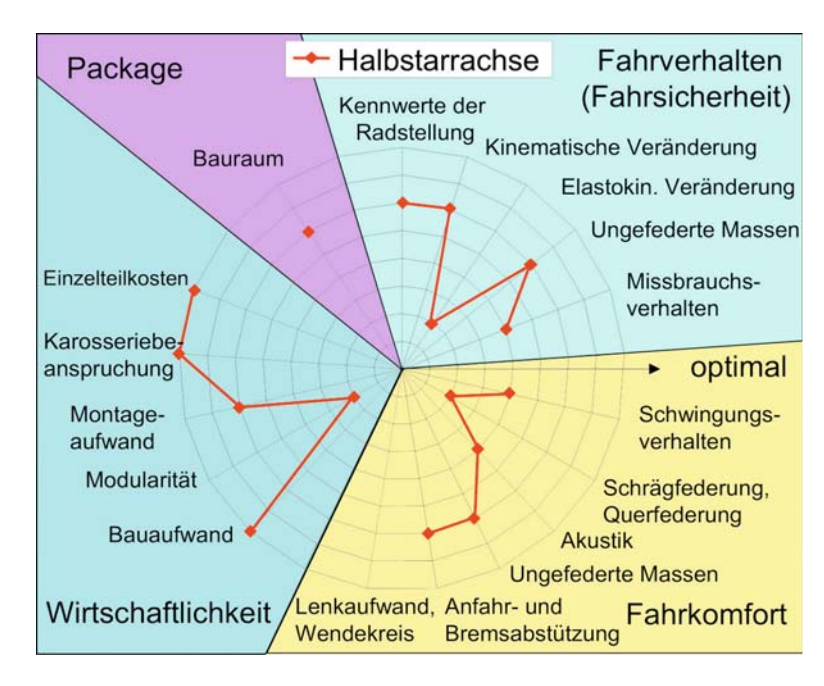


Bild 4-15: Eigenschaftsprofil für Halbstarrachsen

Die Vorteile der Verbundlenkerachsen sind [5]:

- sehr einfache Konzeption: sie besteht aus einem Bauteil und zwei Gummilagern,
- geringer Raumbedarf, flacher Aufbau: nur bei der Torsionskurbelachse erfordert der Verbund Freiraum beim Ein- und Ausfedern,
- leichte Montage und Demontage der Achse,
- Stabilisatorwirkung durch den Querträger,
- kleine, mit dem Rad verbundene Masse,
- günstige Übersetzung Rad zu Federdämpfer,
- beladungsunabhängiges Wankuntersteuern,
- guter Bremsnickausgleich,
- geringe Spurweitenänderung.

Diesen gegenüber stehen die folgenden Nachteile:

- Spannungsspitzen bei den Übergangstellen von Verdrehsteifen zu biegeweichen Bauteilen (Schweißnahtrissgefahr),
- ohne spurkorrigierende Lager übersteuerndes Seitenkraftsteuern,
- ungünstige Seitenkraftabstützung (schlechte Quersteifigkeit),
- ungeeignet als angetriebene Achse,
- ungeeignet für hohe Achslasten, wegen hoher Beanspruchung der Schweißnähte,
- eingeschränktes fahrdynamisches Optimierungspotenzial für anspruchvolle Komfort- und Akustikeigenschaften.

Die Verbundlenkerachsen lassen sich, je nach der Lage der Querverbinder als Torsionskurbel, Koppellenker und Verbundlenkerachse in drei Gruppen teilen (**Bild 4-16**):

- **Torsionskurbelachse:** wenn die Querverbindung sehr nah zur Radmitte liegt und damit ähnliche Eigenschaften einer Starrachse aufweist,
- **Verbundlenkerachse:** wenn die Querverbindung nahe zur Längslenkerlagerung liegt und damit ähnliche Eigenschaften einer Längslenkerachse aufweist,
- **Koppellenkerachse:** wenn sich die Querverbindung am vorderen Drittel der Längslenker befindet und damit Vorteile der Längslenker- mit den Verbundlenkerachsen vereint.

Die Übersteuertendenz der Verbundlenkerachse in der Kurve kann durch spurkorrigierende Lager vermindert werden (s. Abschnitt 5.9).

Die spurkorrigierenden Lager sorgen durch die speziell geformten konischen und asymmetrischen Lager bei Seitenverschiebung durch Querkraft für eine Entgegengesetzte Bewegung, wodurch Selbstlenkung vermieden und der Schwimmwinkel bei Kurvenfahrt verringert wird (**Bild 3-347**).

Die Verbundlenkerachsen sind in vielen europäischen und japanischen Kleinwagen weit verbreitet. Lange Zeit hatten auch zahlreiche Modelle der unterer Mittelklasse, sogar einige Mittelklasse-Modelle (z.B. Audi 100, VW Passat) dieses Achskonzept. Mit der Einführung des „Focus“ in Jahr 1999 hat Ford als Erster das Verbundlenkerkonzept in diesem Segment verlassen, um die kinematischen und elastokinematischen Eigenschaften der Hinterachse weiter zu verbessern. Bald folgten ihm VW, Audi und Peugeot.

4.2.1.1 Torsionskurbelachse

Die Torsionskurbelachsen sind die ältesten halbstarren Achsen (Audi 100 aus 1969) und sind im Prinzip die Mischachsen zwischen Längslenker und torsionsweichen Starrachsen (**Bild 4-17**). Hier fallen besonders der einfache, einteilige Blechlenker mit Federaufnahme und die nahe dem Radmittelpunkt angeschweißte Quertraverse auf.

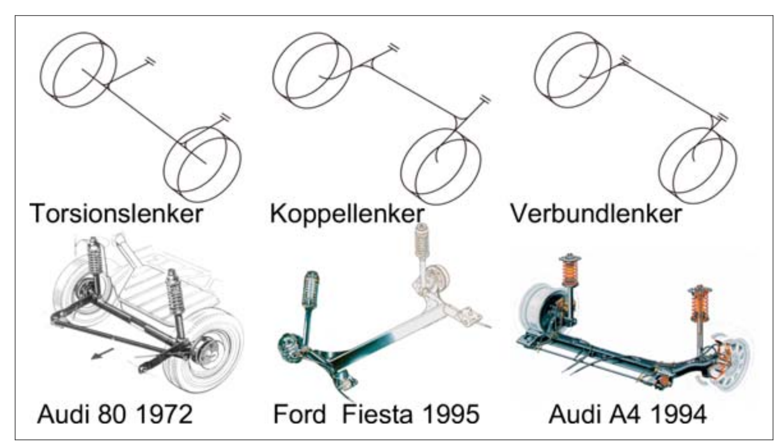


Bild 4-16: Ausführungsformen der Halbstarrachsen

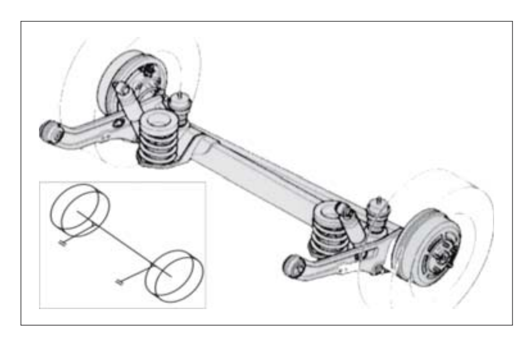


Bild 4-17: Torsionskurbelachse Mazda MPV, (2000)

4.2.1.2 Verbundlenkerachse

Bild 4-18 zeigt die Verbundlenkerachse des Opel Astra (Bj. 2004). Der Querverbinder ist sehr nah an den hinteren Lagern angeordnet, um die Verschränkung der Räder möglichst groß zu halten.

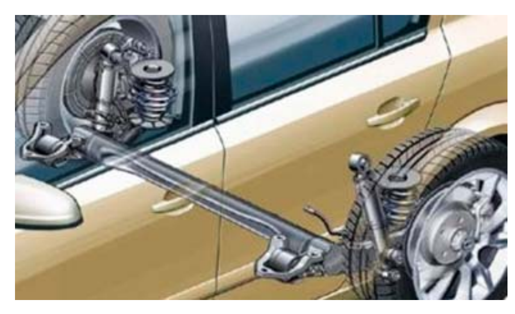


Bild 4-18: Verbundlenker-Hinterachse Opel Astra (2004)

Der Hauptnachteil dieser Anordnung ist die hohe seitliche Nachgiebigkeit unter Querkraft, weil eine direkte Querunterstützung fehlt und damit eine Nachspurvergrößerung verbunden ist. Dieser Nachteil lässt sich mit Hilfe einer opitimierten Anordnung der Führungslager, wie in **Bild 4-19** gezeigt, entschärfen [6].

4.2.1.3 Koppellenkerachse

Bei den Koppellenkerachsen ist der Querverbinder mittig zwischen Lagerstellen und Radmitte angeordnet, um die Seitenkraftabstützung zu verbessern. Außerdem ist die Sturzänderung beim wechselseitigen Federn deutlich geringer.

4.2.2 Dynamische Verbundachse

Als Ersatz für die angetriebenen starren Hinterachsen ohne das Package des Gesamtfahrzeugs zu ändern schlägt Magna Steyr 2001 die dynamische Verbundachse vor.
Die beiden Räder sind mit Längslenkern am Aufbau befestigt und die beiden einzeln aufgehängten Radträger sind zusätzlich mit einer kräftigen Querverbindung miteinander verbunden. Die Querverbindungsstange ist in der Mitte drehbar am Aufbau gelagert (**Bild 4-20**).

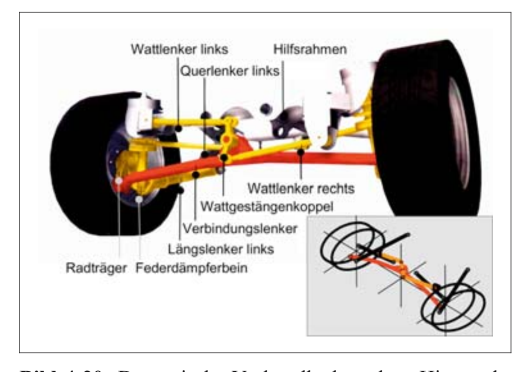


Bild 4-20: Dynamische Verbundlenkerachse, Hinterachse von Magna Steyr (nicht in Serie)

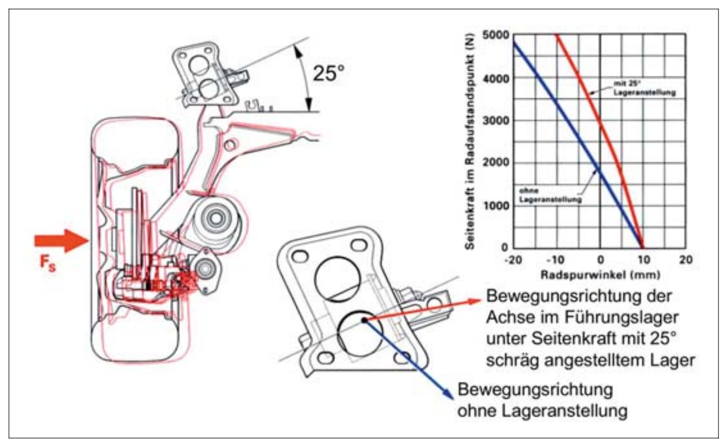


Bild 4-19: Verbessertes elastisches Verhalten der Verbundlenker durch Schräglegung der Gummilager

Diese Verbindung in der unteren Lenkerebene verleiht der Achse die Qualitäten einer Starrachse [7]. Die Querverbindung wird in der Mitte durch ein Wattgestänge geführt. Dadurch wird die Aufbauquerverschiebung gegenüber einer Starrachse deutlich verringert. Bei der Geradeausfahrt verhält sich die Achse wie eine Starrachse ohne große Spur- und Sturzänderungen. Im Gelände sind große Achsverschränkungen möglich, wodurch sich eine gute Traktion ergibt. Außerdem hat die Kinematik ein höheres Momentanzentrum und damit bessere Kippsicherheit bei Kurvenfahrt zur Folge (**Tabelle 4-3**).

Tabelle 4-3: DVA-Konzeptvergleich (DQL Doppelquerlenker, DVA dynamische Verbundachse)

MERKMALE	Starr	DQL	Raum	DVA
Fahrverhalten	-	++	+	+
Geländetauglich	+	-	-	+
Komfort Straße	-	+	+	+
Komfort Gelände	++	-	-	+
Gesamtgewicht	+	++	++	++
Ungefed.Massen	-	+	+	++
Gesamtkosten	+	++	++	++

4.3 Einzelradaufhängung

Bevor die Vielfalt der Einzelradaufhängungen (*Independent Suspension*) beschrieben wird, ist es zweckmäßig, deren kinematische Grundlagen und Grundmodelle zu betrachten.

4.3.1 Kinematik der Einzelradaufhängung

Jede Einzelradaufhängung besteht aus einer kinematischen Kette (ein Gebilde aus starren Gliedern und beweglichen Gelenken), die den Aufbau (Grundglied) mit dem Radträger (Koppelglied) durch Zwischenglieder verbindet. Die einzelnen Glieder sind an deren Enden mit Gelenken miteinander verbunden. Die Art des Gelenkes bestimmt die relative Bewegungsfreiheit der zugehörigen Glieder. Sie kann von 1 bis 5 variieren. Das Rad ist am Radträger drehbar gelagert. Der Drehfreiheitsgrad des Rades ist Bestandteil einer jeden Radaufhängung. Er wird im Folgenden nicht mehr erwähnt.
Eine Einzelradaufhängung und damit der Radträger muss gegenüber dem Aufbau einen Freiheitsgrad besitzen, damit das Rad Fahrbahnunebenheiten folgend, sich entlang einer in der z-Richtung gerichteten Bahnkurve bewegen kann (Radfederung). Diese Einfederbewegung sorgt für eine Schwingungsisolierung des Aufbaus gegenüber den Fahrbahnunebenheiten und wird durch Feder- und Dämpferelemente abgestützt. Für die Lenkbarkeit wird ein zweiter Freiheitsgrad benötigt, der durch Verschieben eines Lenkers (Spurstange) mittels des Lenkgetriebes in y-Richtung bei entsprechender Anordnung der anderen Lenker erreicht wird. Für weitere Betrachtungen wird dieser Lenker in seiner 0-Lage festgehalten; somit haben auch die vorderen Radträger nur einen Freiheitsgrad D.h., die Lenker müssen die prinzipiell sechs Freiheitsgrade des Radträgers auf eins reduzieren.
Die starren Lenker und die Gelenke bilden die kinematischen Glieder, die den Radträger mit dem Aufbau verbinden (**Bild 4-21**). Dazu kommen Feder und Dämpfer; diese begrenzen den sechsten Freiheitsgrad durch ein elastisches Glied, in die Kinematik greifen sie aber nicht ein. Ausnahme ist die Verwendung des Dämpfers als Dreh-Schubgelenk.

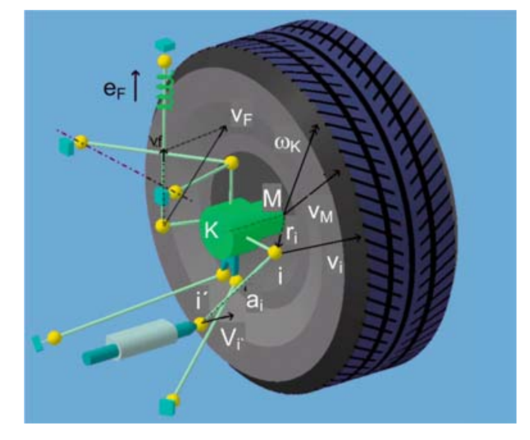


Bild 4-21: Einzelradaufhängung [4]

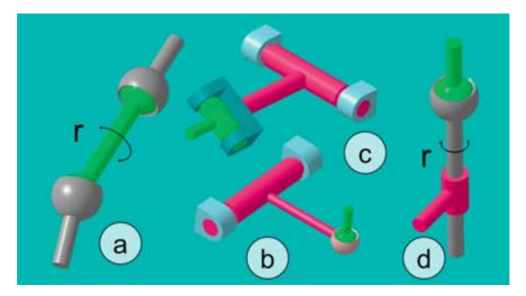


Bild 4-22: Lenkerarten im Fahrwerk [4]

Die erforderliche Anzahl der Lenker für eine Radführung hängt von den kinematischen Eigenschaften der verwendeten Lenkertypen ab (**Bild 4-22**).
Die einfachsten Lenker sind die **2-Punkt-Lenker** (Stablenker) (**Bild 4-22a**) mit Kugel- bzw. Gummilager als Gelenk. Jeder dieser Lenker reduziert einen Freiheitsgrad des Radträgers. Ist der Radträger mit fünf dieser Lenker geführt, bleibt nur noch ein Frei-

heitsgrad für Federbewegungen übrig. Es handelt sich um eine **5-Lenker-Aufhängung** (Raumlenker).
Hat man einen **3-Punkt-Lenker** (Dreieckslenker) (**Bild 4-22b**), d.h., einen Lenker mit einem Gelenk am Rad und zwei Gelenken am Aufbau, dann werden zwei Freiheitsgrade reduziert. Ein 3-Punkt-Lenker ersetzt zwei 2-Punkt-Lenker. D.h., mit zusätzlich drei 2-Punkt-Lenkern entsteht eine **4-Lenker-Aufhängung** (**Bild 4-23**).
Bei Verwendung von zwei 3-Punkt-Lenkern ist nur noch ein zusätzlicher 2-Punkt-Lenker erforderlich; es entsteht eine **3-Lenker-Aufhängung**. Sie ist bekannt als Doppel-Querlenker-Aufhängung, wenn die beiden Lenker quer zum Fahrzeug angeordnet sind.
Setzt man nun einen **4-Punkt-Lenker** (Trapezlenker) (**Bild 4-25**) ein, dann wird der Radfreiheitsgrad um 4 reduziert. Zusammen mit einem 2-Punkt-Lenker hat der Radträger nur noch einen Freiheitsgrad. Es ist eine **2-Lenker-Aufhängung**.
Schließlich gibt es noch als Hinterachse die **1-Lenker-Aufhängung**, bei der der Radträger über ein Drehgelenk direkt mit dem Aufbau verbunden wird. Die Orientierung des Drehlagers gibt die Bahnkurve des mit einem rotatorischen Freiheitsgrad belassenen Radträgers beim Einfedern vor (**Bild 4-24**).
Weitere Gelenklagerarten sind Drehschublager, z.B. Stoßdämpfer, deren Kolbenstange relativ zum Dämpfergehäuse dreh- und verschiebbar sind (**Bild 4-22d**). Wenn das Dämpfergehäuse fest mit dem Radträger und die Kolbenstange mit einem Kugel- bzw. Gummilager am Aufbau verbunden sind, werden 2 rotatorische Freiheitsgrade eliminiert. Dieses als **Dämpferbein-Aufhängung** bezeichnete Konzept benötigt 3 weitere 2-Punkt-Lenker, oder einen 3-Punkt und einen 2-Punkt-Lenker um auf den einen Freiheitsgrad zu kommen. Wenn nun die Aufbau-Feder platzsparend um den Dämpfer angeordnet ist, spricht man von **Federbein-Aufhängung** mit zwei 2-Punkt-Lenkern (**Bild 4-67**) oder nur einem 3-Punkt-Lenker auf der unteren Ebene (**Bild 4-57**).
Es gibt darüber hinaus andere Lenker- und Gelenkarten. Diese ermöglichen weitere Aufhängungsvarianten [4], die jedoch keine praktische Anwendung haben und hier nicht weiter vertieft werden.
Die Systematik für die Einzelradaufhängung wird schließlich um zwei weitere Aspekte erweitert um sie zu vollenden: Orientierung und Schnittpunkt der Lenker.
Die Orientierung der Lenker kann quer, längs oder schräg zur Fahrtrichtung sein (**Bild 4-24**).

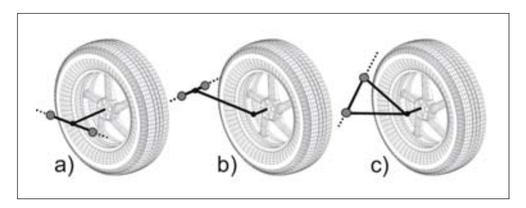


Bild 4-24: Quer-, Längs- und Schräganordnung der Lenker (Varianten a, b und c)

Je nach dieser Lage können sie dann die Kräfte in Quer-, Längs- oder in beiden Richtungen übertragen. Dieses ist wichtig, weil eine Radaufhängung prinzipiell in Querrichtung möglichst steif und in Längsrichtung möglichst weich sein muss.
Die Schnittpunkte der Lenker einer Aufhängung bestimmen die grundsätzliche Art der kinematischen Kette. Die kinematischen Ketten lassen sich als ebene, als sphärische oder als räumliche kinematische Kette klassifizieren (**Bild 4-25**) [4].

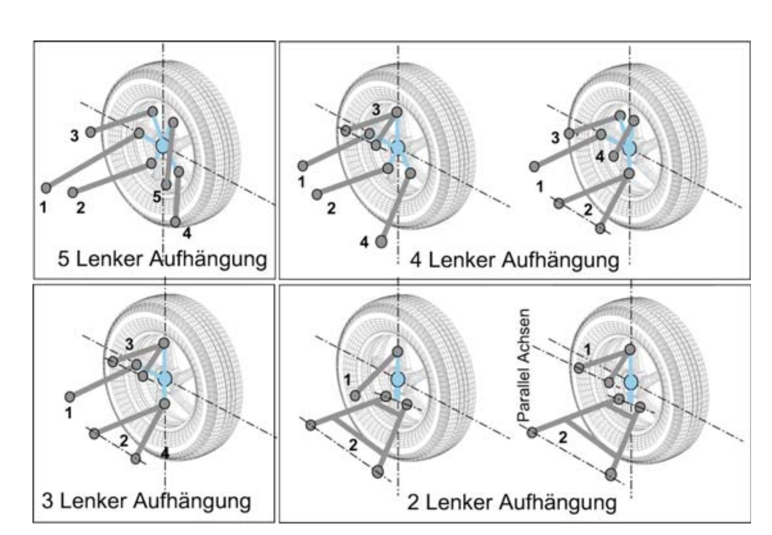


Bild 4-23: Einzelradaufhängungen mit 5-, 4-, 3- und 2-Lenker

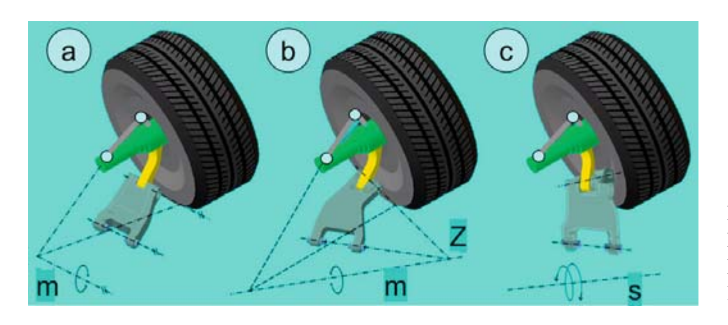


Bild 4-25:
Ebene, sphärische und räumliche Einzelradaufhängungen mit Trapezlenker

Eine ebene Anordnung ist gegeben, wenn die Drehachsen parallel zueinander laufen und dadurch auch die Momentanachse der Radträger parallel zu den Achsen verläuft. Das Rad bewegt sich um diese Achse in einer Ebene und führt eine ausschließlich **ebene Bewegung** aus. Die Momentanachse verschiebt sich immer parallel zu dieser Linie *m*.
Wenn die Drehachsen der unteren Lenker nicht parallel sind, sondern sich in einem Punkt schneiden, dann bleibt dieser Punkt beim Ein- und Ausfedern immer ortsfest. Alle Punkte des Radträgers üben eine **sphärische Bewegung** um diesen Zentralpunkt aus. Im Gegensatz zur ebenen Bewegung verschiebt sich hier die Momentanachse nicht parallel sondern pendelt um diesen Punkt.
Schneiden sich die Drehachsen nicht, dann führt der Radträger im Raum eine Bewegung aus, die durch überlagerte Momentandrehungen um beide Drehachsen bei gleichzeitiger Kugelbewegung um den fahrzeugseitigen Anlenkpunkt des Stablenkers gekennzeichnet ist. Diese Bewegung lässt sich auf eine Momentanschraubung um die Schraubachse *s* zurückführen. Der Radträger vollzieht eine **räumliche Bewegung**.
Die kinematischen Optimierungsfreiheiten sind bei einer ebenen Aufhängung gering, weil die Raderhebung durch Bestimmung der Momentanachse im Raum mit nur drei Parametern eindeutig festliegt. Bei der sphärischen Aufhängung hat man einen vierten frei wählbaren Parameter. Erst bei einer räumlichen Aufhängung kommt der fünfte Parameter hinzu. Somit kann man bei der Auslegung der Kinematik fünf unabhängige Kenngrößen bestimmen: Rollzentrum, Stützwinkel, Schrägfederungswinkel, Vorspuränderung und Sturzänderung.
Schließlich unterscheidet man als Klassifizierungsmerkmal zwischen den unteren und oberen Lenkerebenen (**Bild 4-26**).

4.3.2 Vorteile der Einzelradaufhängungen

Der Anteil der Einzelradaufhängung an den neuen Pkw-Modellen steigt ständig. Der Grund liegt in den folgenden allgemeinen Vorteilen der Einzelradaufhängung:

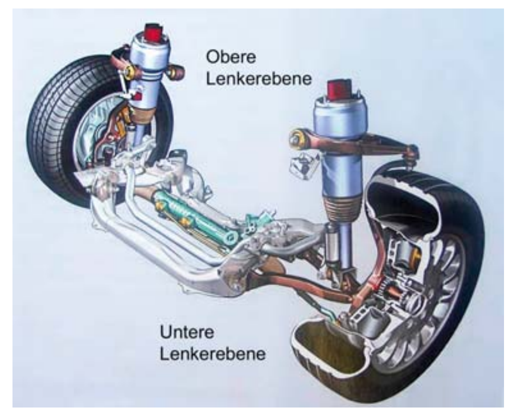


Bild 4-26: Obere und untere Lenkerebenen

- geringe ungefederte Masse,
- keine gegenseitige Beeinflussung der Räder bei Wechselbelastungen,
- große kinematische und elastokinematische Auslegungsfreiheiten,
- einfache Isolierung der Fahrbahnschwingungen und -geräusche.

Die Nachteile dagegen sind:

- geringe Verschränkung, niedrige Bodenfreiheit im Gelände,
- Belastungsausgleichswirkung der Räder in Kurvenfahrt nur über Stabilisator möglich,
- nicht so robust wie die Starrachsen.

4.3.3 Einzelradaufhängungen mit einem Lenker

Die einfachste Einzelradaufhängung entsteht, wenn der Radträger nur mittels einem einzigen Lenker mit dem Aufbau verbunden wird. Der Lenker muss fest mit dem Radträger verbunden sein und zum Aufbau hin eine Drehlagerung aufweisen (**Bild 4-27**). Je nach der Ausrichtung der Lenkerdrehachse heißen sie dann a) Längslenker-, b) Schräglenker- oder c) Quer- bzw. Pendellenker-Einzelradaufhängung.

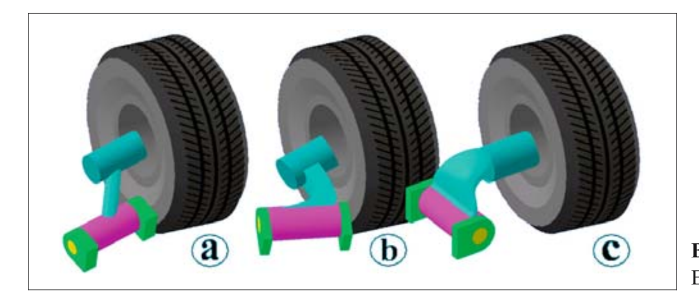


Bild 4-27:
Einzelradaufhängung mit einem Lenker

Da sowohl Längs- als auch Querkräfte von diesem Lenker aufgenommen werden müssen, muss er möglichst groß und steif gestaltet sein. Außerdem muss er die Drehverbindung zum Aufbau als Doppellager auf derselben Achse und mit weit auseinander liegenden Lagerstellen besitzen, um die im Lenker entstehenden Drehmomente mit möglichst kleinen Kräften in den Aufbau einzuleiten. In dieser Hinsicht ist die Schräglenkerachse die beste Lösung.
Die Pendellenkeraufhängung mit nur einem Querlenker (**Bild 4-27c**) hat keine Bedeutung, weil ein einziger Querlenker die Längskräfte nicht übertragen kann.
Einzelradaufhängungen mit einem Lenker kommen heute nur noch an den Hinterachsen zum Einsatz.

4.3.3.1 Längslenker-Einzelradaufhängungen

Die Längslenkerachsen (*Trailing Arm Suspension*) haben nur einen Längslenker, der Längs- und Querkräfte aufnimmt und den Radträger um die quer liegende Drehachse schwingen lässt. Die Drehachse liegt genau quer unter dem Auto. Die Lenker sind in Längsrichtung mit dem Aufbau elastisch gelagert, um der Achse gute Längsfederungs- und damit gute Komforteigenschaften zu verleihen. An der Hinterachse ist es ein ziehender und an der Vorderachse (sehr selten) ein schiebender Lenker. Der englische Name *Trailing Arm* bezieht sich auf den ziehenden Lenker.
Der Längslenker der Hinterachse wird beim Bremsen auf Zug und beim Beschleunigen auf Druck sowie beim Auftreten der Querkräfte auch auf Biegung und Torsion belastet. Um die Änderungen an Spur, Sturz usw. gering zu halten, muss er sehr steif gestaltet werden.
Ein wichtiger Vorteil der Längslenkeraufhängung ist der schmale Bau, der einen tiefen Kofferraum ermöglicht und viel Freiraum für Tank, Reserverad, Auspuffschalldämpfer übrig lässt.
Durch Variation des Lagerpunktes der Längslenker (Abstand und Höhe) lässt sich die Kinematik optimieren. Dieser Punkt ist der Nickpol der Achse. Mit der Lenkerlänge und der Anordnung der Feder auf dem Lenker lässt sich die Progressivität der Federung beeinflussen.

Nachteilig sind der auf Fahrbahnhöhe liegende Momentanpol der Achse und die stärkere Neigung der Räder in den Kurven. Bei der Ein- und Ausfederung beanspruchen die sich ändernden Hochkräfte die Längslenker unterschiedlich stark auf Torsion und entsprechend ändern sich die Sturzwinkel. Aufgrund der Elastizitäten an der Lagerung geht das kurvenäußere Rad in Nachspur und das Fahrzeug tendiert zum Übersteuern.
Der Längslenker kann fest am Radträger befestigt werden oder aber über ein Scharniergelenk drehbar gelagert sein. Bei der festen Verbindung muss er Seitenbewegungen des Rades ohne Dauerbruch aushalten können, deshalb wird er meistens gehärtet.
Es ist auch häufig der Fall, dass die beiden Längslenker mit einem Torsionsstab miteinander verbunden werden, um eine Stabilisatorwirkung in Kurvenfahrt zu erzielen. Ein Beispiel für eine Längslenker-Anordnung ist die Hinterachse der DC A-Klasse (**Bild 4-28**), die bei der Neuauflage in 2005 durch eine Deichselachse (**Bild 4-14**) ersetzt wurde.

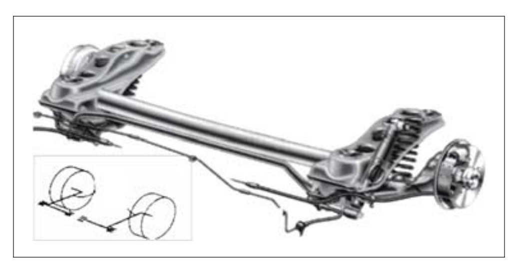


Bild 4-28: Längslenkeraufhängung (*Trailing Arm Suspension*) (Hinterachse DC A-Klasse, Bj. 1997)

Die Vorteile der Längslenkeraufhängung sind:

- einfacher Aufbau, nur zwei Lenker,
- geringer Raumbedarf
- voneinander unabhängige Radmassen und
- voneinander unabhängige Radebenen.

Die Nachteile dagegen sind (**Bild 4-29**):

- geringe Rollsteifigkeit ohne Stabilisator,
- ohne Sondermaßnahmen elastische Verdrehung in Richtung Übersteuern bei Seitenkraft.

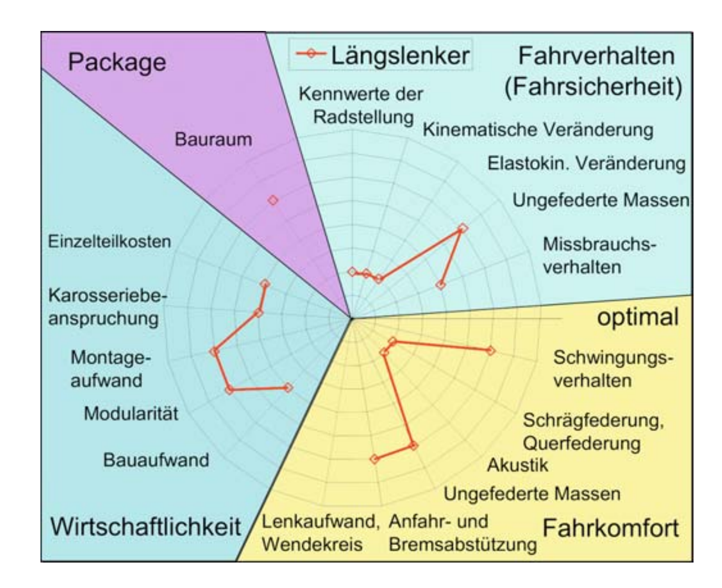


Bild 4-29: Eigenschaftsprofil der Längslenkeraufhängungen [2]

4.3.3.2 Schräglenker-Einzelradaufhängungen

Die Längs- und Querkräfte können durch einen einzigen Lenker am besten aufgefangen werden, wenn der Lenker schräg angeordnet ist (*Semi Trailing Arm Suspension*) und aufbauseitig zwei Lagerstellen mit großem Abstand aufweist. Damit wird ein guter Kompromiss zwischen Längslenker- und Pendelachsen erreicht, der die technischen Vorteile der beiden Konzepte besitzt, ohne große Nachteile zu haben (**Bild 4-30**).

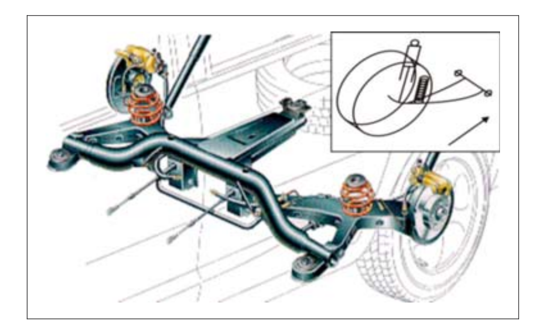


Bild 4-30: Schräglenkeraufhängung (Hinterachse VW Sharan, Bj. 1996)

Die Drehachse liegt in der Draufsicht in der horizontalen Ebene in einem großen Winkel (Pfeilungswinkel α) und in der Quersicht in einem deutlich kleinerem Winkel (Dachwinkel β) zur Fahrzeugquerachse. Der Schräglenker ist fest am Radträger befestigt.
Bei gegebener Lenkerlänge lassen sich durch Anpassen der beiden Winkel α und β die gewünschten kinematischen Eigenschaften aufeinander abstimmen [6], ähnlich wie die Winkel der oberen und unteren Lenker der Doppelquerlenker, die jedoch zusätzlich zwei Drehpunkte als Optimierungsparameter am Radträger anbieten.
Ein Vergrößern des Pfeilungswinkels bewirkt ein Ansteigen des Wankzentrums, das jedoch durch den Dachwinkel wieder abgesenkt werden kann. Eine kürzere Lenkerlänge lässt nur einen eingeschränkten Federweg zu, erlaubt dafür aber ein höheres Wankzentrum. Ein langer Lenker ergibt ein tiefer liegendes Wankzentrum und eine geringere Spurweitenänderung. Eine Verkleinerung des Pfeilungswinkels oder Vergrößerung des Dachwinkels bewirken eine günstigere Bremsnickabstützung. Je größer der Pfeilungswinkel wird, umso kleiner wird die Sturzänderung.
Durch den Pfeilungswinkel gehen die Räder beim Ein- und Ausfedern geringfügig in Vorspur. Der Dachwinkel wird negativ ausgelegt, um ein Wankuntersteuern durch eine Zunahme der Vorspur am kurvenäußeren Rad zu erreichen.
Die Vorteile der Schräglenkeraufhängung sind (**Bild 4-31**):

- ♦ guter Kompromiss aus Längslenker- und Pendelachsen,
- ♦ Auslegungspotenzial durch Optimierung des Pfeilungs- und Dachwinkels.

Die Nachteile dagegen sind:

- ♦ Seitenkräfte zwingen das Rad in Nachspur,
- ♦ große Sturzänderungen bei der Einfederung,
- ♦ unabhängige Auslegung der Sturz- und Vorspurkinematik nicht möglich,
- ♦ steife Lenker und Anlenkpunkte notwendig,
- ♦ großer Abstand der Lenklager notwendig,
- ♦ guter Komfort nur mit einem gummigelagerten Achsträger erreichbar.

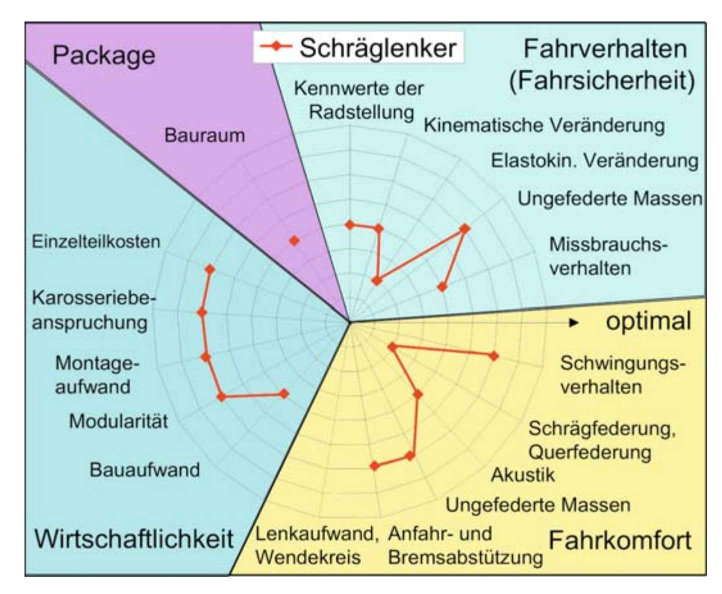


Bild 4-31: Eigenschaftsprofil der Schräglenkeraufhängung [2]

4.3.3.3 Schraublenker-Einzelradaufhängungen

Der Schräglenker ist eine ebene Aufhängung und in der kinematischen Auslegungsfreiheit noch eingeschränkt. Wird er nun entlang der Drehachse vom Radweg abhängig verschiebbar gestaltet, indem ein kurzes Zusatzgelenk unter den äußeren Arm angebracht wird (**Bild 4-32**), entsteht ein räumlicher Mechanismus. Durch die Festlegung der Länge und des Winkels des Zusatzgelenks können weitere Parameter beeinflusst werden (5er BMW, Bj. 1981).

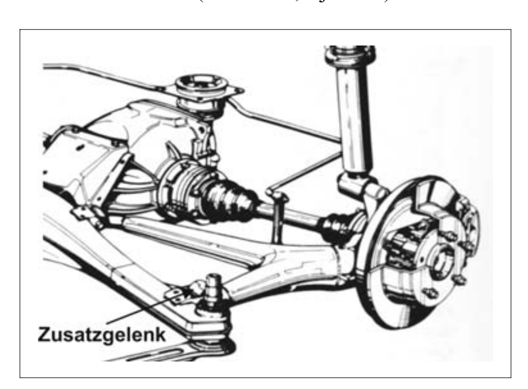


Bild 4-32: Schraublenkerachse (Hinterachse 5er BMW, Bj. 1981)

4.3.4 Einzelradaufhängungen mit zwei Lenkern

Es ist einfacher, die Längs- und Querkräfte mit zwei Lenkern, die winkelig zueinander angeordnet sind, aufzunehmen als nur mit einem Lenker. Bestes Beispiel dafür sind die Pendelachsen, die dann durch einen Längslenker abgestützt werden.

4.3.4.1 Quer-Längs-Pendelachsen

Pendelachsen (*Swing Axle*) können auch als in der Mitte durchgesägte Starrachsen beschrieben werden [4]. Die beiden Querlenker sind fast in der Achsmitte pendelnd (am Hinterachsgetriebe) gelagert und führen die Seitenwellen mit dem Vorteil, dass diese nicht verschiebbar gestaltet werden müssen und daher mit Kardangelenken ausgestattet werden können (**Bild 4-33**). Zwei Längslenker übernehmen die Längsführung der Achse (MB 220, Bj. 1959, VW Käfer, Rover 2000, Bj. 1963).

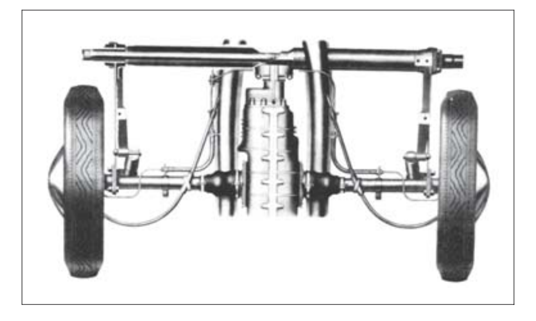


Bild 4-33: Pendelachse (Hinterachse VW Käfer, Bj. 1948)

Obwohl es sich um ein einfaches und kostengünstiges Konzept für angetriebene Hinterachsen handelt, setzt man Pendelachsen heute überhaupt nicht mehr ein: Die sehr starken Sturzänderungen beim Ein- und Ausfedern lassen ein heute akzeptables Kurvenver-

halten nicht zu, abgesehen von sehr starkem Reifenverschleiß. Die in der Kurve entstehende Seitenführungskraft am kurvenäußeren Rad versucht den Aufbau anzuheben und reduziert durch großen positiven Sturz die maximal übertragbare Seitenkraft am Reifenlatsch [3]. Der Aufbau kann dann durch Aushebeln des Hinterwagens und Einklappen des kurvenäußeren Rades nach außen umkippen (*Jacking Force*).

4.3.4.2 Trapezlenker mit einem Querlenker (Audi 100 Quattro)

Eine Radaufhängung mit einem Trapezlenker und einem in der oberen Ebene angebrachten Querlenker bildet die Hinterachse des Audi 100 Quattro (**Bild 4-34**). Der 2-Punkt-Querlenker kontrolliert den Sturzwinkel. Der sehr breit gelagerte Trapezlenker nimmt sowohl das beim Bremsen bzw. beim Anfahren entstehende Drehmoment als auch alle Längskräfte auf. Die Spuränderungen werden durch die sehr langen Lagerabstände am Radträger (295 mm) und Aufbau (750 mm) minimiert. Diese Anordnung bietet eine sehr flache, raumsparende Raumbelegung, die für die Hinterachsen wichtig ist.

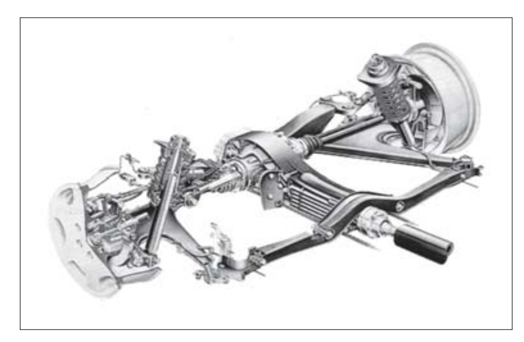


Bild 4-34: Trapezlenkeraufhängung (Hinterachse Audi 100 Quattro, Bj. 1984)

4.3.4.3 Trapezlenker mit einem flexiblen Querlenker (Porsche Weissachachse)

Eine Radaufhängung mit einem Trapezlenker und einem Querlenker, dessen Drehachsen sich am Aufbau an einem Punkt schneiden, gehört zur sphärischen Aufhängung (**Bild 4-35**). Der 2-Punkt-Querlenker kontrolliert den Sturzwinkel. Die Elastokinematik wird durch einen als Viergelenkgetriebe gestalteten Trapezlenker bestritten. Sein vorderes, der Längsfederung dienendes Lager, ist eine Steuerschwinge, die durch ein Gummilager am Fahrgestell und ein Lager mit zwei harten Federraten am Trapezlenker befestigt ist. Diese Anordnung sorgt dafür, dass das Rad beim Bremsen oder Gaswegnehmen in Vorspur geht.

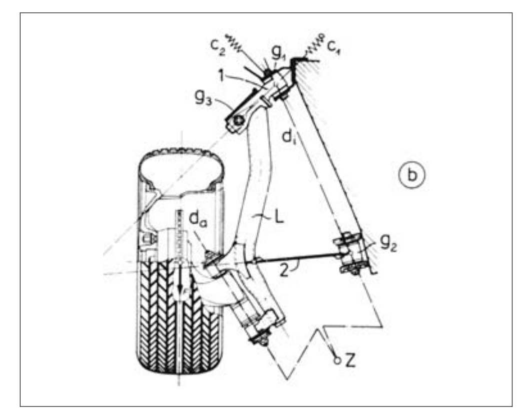


Bild 4-35: Trapezlenkeraufhängung (Porsche Weissachachse (Hinterachse), Porsche 928, Bj. 1977)

4.3.5 Einzelradaufhängungen mit drei Lenkern

Je mehr Lenker eine Aufhängung besitzt, desto mehr kinematisches Auslegungspotenzial bietet sie an. Wenn jedoch mehrere Lenker den Radträger führen, können sie nicht mehr fest sondern nur über Dreh- oder Kugelgelenke mit ihm verbunden werden. Sonst wird die Kinematik überbestimmt. Auch die Drehachse des Einzellenkers am Aufbau muss drei Drehfreiheiten erhalten (meist durch Gummilager).

4.3.5.1 Zentrallenker-Einzelradaufhängung

Die „Zentrallenkerachse“ (**Bild 4-36**) ist eigentlich ein mit dem Radträger fest verbundener Längslenker, der aufbauseitig ein Gummilager besitzt. Die zwei zusätzlichen Querlenker, die die Querkräfte aufnehmen, haben Drehachsen, die durch den Anlenkpunkt des Zentrallenkers am Aufbau durchlaufen. Es ergibt sich eine sphärische Einzelradaufhängung (3er BMW, Bj. 1990). Das Verhältnis der Lenkerlängen zum Querpolabstand bestimmt die Relativbewegung zwischen der Radachse und der Momentanachse, welche für das Eigenlenkverhalten maßgebend ist. Die Elastokinematik, d.h., die Auslegung des elastischen Verhaltens unter Seiten- und Längskräften, wird über die räumliche Anstellung der Hauptachsen und der Hauptfederraten des großvolumigen Gummilagers im Längslenker unter Berücksichtigung der Grundrisspfeilung bestimmt [4]. Die Bauart einer Zentrallenker-Hinterachse mit zwei 2-Punkt-Querlenkern und einem Längslenker wurde auch für die BMW Mini Hinterachse übernommen.

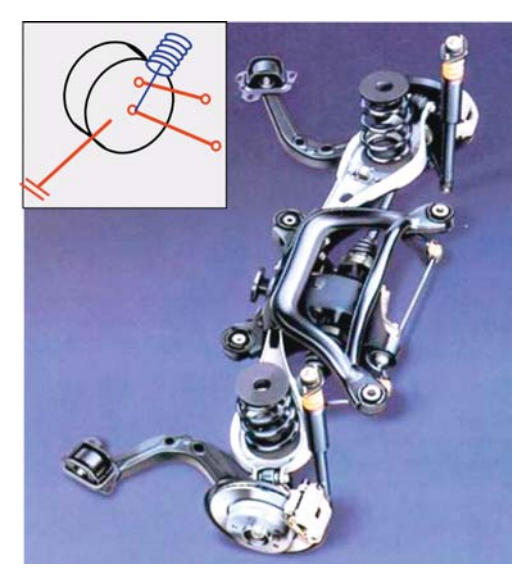


Bild 4-36: Zentrallenkeraufhängung (Hinterachse 3er BMW, Bj. 1990 und Bj. 1998)

4.3.5.2 Doppelquerlenker-Einzelradaufhängungen

Wenn die Achse nur mit quer liegenden Lenkern aufgehängt wird, muss ein Lenker oberhalb und der andere unterhalb der Radmitte angeordnet sein, um alle Kräfte und Momente abstützen zu können (**Bild 4-37**). Zusätzlich wird ein Spurlenker benötigt, um das Lenken des Rades zu verhindern (oder zu ermöglichen). Diese Aufhängungsart heißt Doppelquerlenker-Aufhängung (*Double Wishbone Axle*)

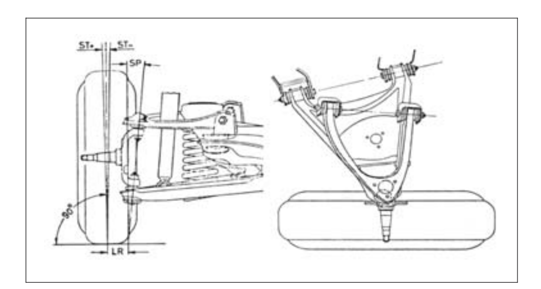


Bild 4-37: Doppelquerlenker-Radaufhängung (DQL)

Durch die doppelte Anbindung der 3-Punkt-Lenker am Aufbau, können die Querlenker neben den Querkräften auch die Längskräfte aufnehmen. Die Lenker haben radträgerseitig Kugelgelenke und aufbauseitig Gummilager, die relativ steif sind, um diese Kräfte aufnehmen zu können. Die beiden Gummilager sollten dieselbe Drehachse haben, um eine saubere Kinematik zu gewährleisten. Der Fahrkomfort wird dann durch einen zwischen Lenker und Aufbau angeordneten Achsträger erreicht, indem dieser mit großvolumigen und weichen Gummilagern am Aufbau befestigt wird. Außerdem wird der Fahrkomfort auch dadurch verbessert, dass die Aufbaubelastungen und die Toleranzen zwischen den Lagerstellen gering gehalten werden können.

Die Doppelquerlenker-Kinematik lässt sich durch Änderung der sechs frei wählbaren Anbindungspunkte (Hardpoints) beider Querlenker großzügig optimieren. Die Verbindung der Mittelpunkte der beiden Kugelgelenke am Radträger entspricht der Lenkachse.

Zweckmäßig ist es, wenn die oberen Lenker kürzer sind (daher stammt auch die amerikanische Bezeichnung SLA, *Short Long Axle*). In diesem Fall sind die Änderungen an Sturz und Spurweite geringer. Der kurze obere Lenker zieht in der Kurve das einfedernde kurvenäußere Rad zu negativem Sturz und vergrößert damit die Reifenlatschfläche. Außerdem ist es räumlich günstiger, wenn die obere Lenkerebene nicht zu sehr in den Motor- oder Kofferraum eindringt. Die Achsen der Gummilager werden schräg angeordnet um die Brems- und Anfahrnickkräfte abzustützen. Der Nickpol befindet sich im Schnittpunkt der Verlängerung der Lagerachsen und ist durch deren Winkellage beeinflusst.

Der Momentanpol kann in einem großen Bereich variiert werden. Er wird meist tief, in der Nähe der Fahrbahnoberfläche positioniert, um die Änderungen der Spurbreite klein zu halten. Der untere Arm liegt meist fast horizontal und der obere schräg nach unten, um beim Einfedern den Sturz in eine negative Richtung zu zwingen. Bei Wankbewegungen überträgt sich damit nur ein geringer Anteil des Wankwinkels auf den Sturzwinkel des kurvenäußeren Rades gegenüber der Fahrnbahn. Damit bleibt die Querführung der Achse weitgehend unbeeinflusst von Wankbewegungen des Aufbaus. Die Radträgerquerneigung ändert sich auf die gleiche Weise wie der Sturz und vergrößert das Rückstellmoment des stärker belasteten Außenrades in der Kurve [8].

Durch die Schrägstellung der Verbindungsachse der beiden äußeren Gelenkpunkte liegt dann der Nickpol dicht hinter der Achse. Hierdurch wird während des Einfederns die Radträgerlängsneigung größer und es entsteht ein größerer Nachlauf, wodurch sich der Geradeauslauf verbessert, die Haltekräfte in der Lenkung bei Kurvenfahrt jedoch erhöhen. Die Anordnung der Drehachsen in der Horizontalebene beeinflusst auch die Lenkachsenwinkel während des Federns. Wenn dieser Winkel und die Stellungen der Querlenker richtig gewählt sind, kann die Radträgerbewegung auf die erforderlichen Kurseigenschaften eingestellt werden.

Eine weitere Möglichkeit, die kinematischen Eigenschaften weiter zu verbessern, ist die Verlegung der oberen Kugelgelenkanbindung oberhalb des Reifens.

Damit kann die Lenkachse ohne Kollisionsgefahr mit der Felge fast frei gewählt werden (Reduzierung des Störkrafthebelarms, Rollwinkel usw.). Außerdem werden durch deutlich erweiterte Wirkabstände zwischen

den äußeren Gelenken die Kräfte an den oberen 3-Punkt-Lenkern geringer. Zugleich können die oberen Querlenker weiter außen angeordnet werden, um mehr Platz für das Antriebsaggregat freizumachen. Der große Wirkabstand erhöht auch die Genauigkeit der Radführung. Der Nachteil ist jedoch mehr Gewicht und höhere Kosten des Achsträgers.

Die Feder- und Dämpferkräfte werden direkt auf die Lenker eingeleitet und verursachen große Biegemomente, die das Gewicht und die Kosten des Lenkers deutlich erhöhen. Die Anstützung sollte möglichst dicht zum Radträger sein, um die Biegung und Feder-Dämpferkräfte klein und die Übersetzung groß zu halten. Prinzipiell können sowohl die oberen als auch die unteren Lenker diese Kräfte aufnehmen, geeigneter ist jedoch der untere Lenker. **Bild 4-38** zeigt das Eigenschaftsprofil der Doppelquerlenkeraufhängung.

Die Vorteile der Doppelquerlenker sind:

- großes Auslegungspotenzial; freizügige Auswahl der Wank- und Nickpole, Einschränkung der Sturz- und Spurweitenänderungen möglich,
- hohe Quersteifigkeit.

Die Nachteile dagegen sind:

- höhere Herstellungskosten,
- großen Raumbedarf (besonders ungünstig an der oberen Lenkerebene),
- resultierende Kräfte an den Lagerpunkten machen einen Achsträger unverzichtbar.

Die Doppelquerlenkeraufhängungen lassen sich in zwei Varianten auslegen:

- **Kurzer Abstand** (*Short Spindle*) zwischen den unteren und oberen Kugelgelenken, damit diese in der Felge Platz finden und dicht zur Radmitte hineinragen (**Bild 4-39**).
- **Langer Abstand** (*Long Spindle*) zwischen den unteren und oberen Kugelgelenken, (oberes Gelenk ist oberhalb des Reifens) um den oberen Punkt ohne Felgenbegrenzung noch mehr nach außen platzieren zu können (**Bild 4-40**).

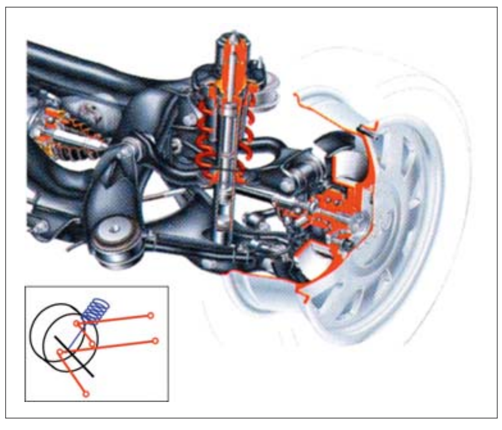


Bild 4-39: Doppelquerlenkeraufhängung mit kurzem Gelenkabstand, *Short Spindle* (Hinterachse Audi 100 Quattro, Bj. 1996)

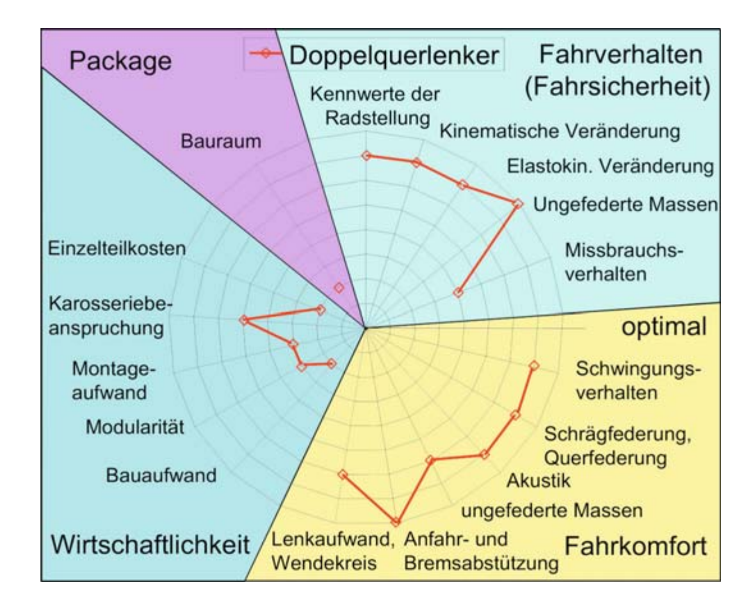


Bild 4-38: Eigenschaftsprofil der Doppelquerlenkeraufhängung [2]

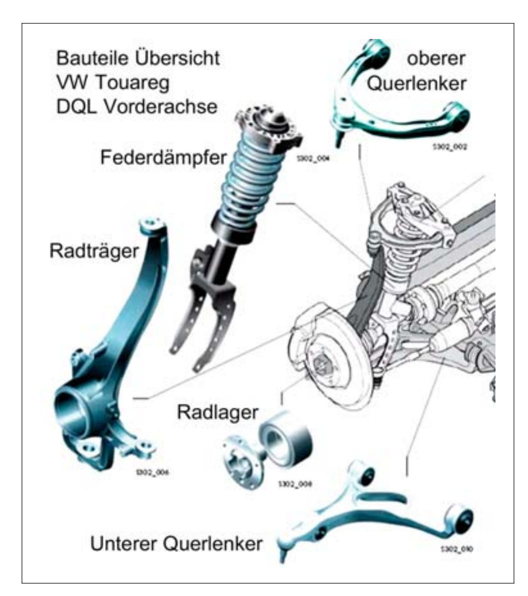


Bild 4-40: Doppelquerlenkeraufhängung mit langem Gelenkabstand, *Long Spindle* (Vorderachse VW Touareg/ Porsche Cyanne, Bj. 2002)

4.3.6 Einzelradaufhängungen mit vier Lenkern

Die Aufhängung des Rades mit vier Lenkern ist möglich, wenn keine von diesen Lenkern fest (unmittelbar) am Radträger befestigt sind, d.h., jeder Lenker muss bewegliche Gelenkpunkte haben. Zweckmäßig ist es, wenn eines der Lenker längs angeordnet wird. Da die Längslenker der Hinterachse sehr geringe Querwinkeländerungen haben, reicht es aus, wenn der Längslenker als Schwertlenker zwar fest am Radträger befestigt ist, selbst jedoch eine gewisse Elastizität besitzt, um die kinematisch bedingten Bewegungen ausgleichen zu können.

4.3.6.1 Mehrlenker-Einzelradaufhängungen an Hinterachsen

Da die Hinterräder nicht gelenkt werden, erfordert dies keine drehbaren (Kugel)Gelenke an den Befestigungen zum Radträger. Die 3-Punkt-Lenker sind daher im Falle der Hinterräder oft aufgelöst oder über eine gemeinsame Achse am Radträger befestigt. Hierdurch wird es ermöglicht, die Spur und den Sturz während des Radhubes durch unterschiedliche Lenker und somit mit mehr Freiheiten auszulegen und einzustellen. Dies nennt man Mehrpunktlenkung [9] und diese Art der Radaufhängung Mehrlenkeraufhängung (*Multi-link Suspension*). Diese Aufhängungsart entsteht durch Auflösung der 3-Punkt-Lenker. Oft positioniert man einen der aufgelösten Lenker in der Längsrichtung und mit weicher Gummilagerung, um die Längskräfte elastisch aufzunehmen (verbesserten Rollkomfort), und die anderen in der Querrichtung. In diesem Fall spricht man von Längs-Querlenker. Eine weitere Charakteristik der Mehrlenkerachsen ist, dass die radführenden Lenker nicht auf Biegung beansprucht werden [3].

Für die Mehrlenkeraufhängungen ist es nicht möglich, ein eindeutiges Eigenschaftsprofil zu geben, weil es sehr viele unterschiedliche Mehrlenkeraufhängungen gibt. Dennoch wird versucht, mit **Bild 4-41** ein allgemeines Profil zu erstellen [2].

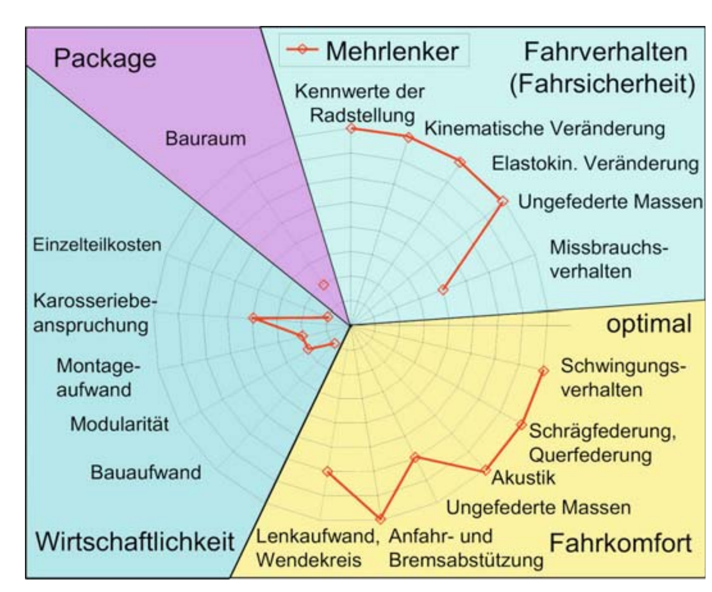


Bild 4-41: Allgemeines Eigenschaftsprofil der Mehrlenkeraufhängungen

4.3.6.2 Mehrlenkerachsen durch Auflösung der unteren 3-Punkt-Lenker der DQL-Achse

Kinematisch gesehen lässt sich jeder 3-Punkt-Lenker durch zwei 2-Punkt-Lenker ersetzen. Damit entstehen Aufhängungen mit vier oder fünf Lenkern. Da die steigende Anzahl der festzulegenden Parameter eine bessere Auslegung der Aufhängung ermöglicht (jede Auflösung bringt einen zusätzlichen Hardpoint oder drei neue Koordinaten, die frei festgelegt werden können) lassen sich die Kennwerte besser an die Anforderungen anpassen, d.h., Fahrsicherheit- und/oder Fahrkomfort verbessern. Die Kosten jedoch erhöhen sich, weil man nun vier statt drei Gelenke benötigt.
Durch Auflösung des unteren 3-Punkt-Lenkers können die beiden neuen Lenker so ausgerichtet werden, dass der quer liegende Lenker allein die Seitenkräfte aufnimmt und steif ausgelegt wird und der schrägliegende Lenker den Aufrollkomfort erhöht, indem er weich gelagert wird; die beiden Lenker würden sich nicht mehr gegenseitig negativ beeinflussen. Dann hat man auch die Möglichkeit, durch unabhängige Auswahl der Gummilagersteifigkeiten, die Elastokinematik zu optimieren.
Die erste Möglichkeit der Auflösung ist die Lagerung des zweiten Lenkers nicht am Radträger, sondern am ersten Lenker. Die Kinematikpunkte bleiben unverändert; die weiche Lagerung der zusätzlichen Verbindung verbessert den Abrollkomfort. Beispiele dazu sind Porsche 911 und Jaguar S-Type (**Bild 4-42**).

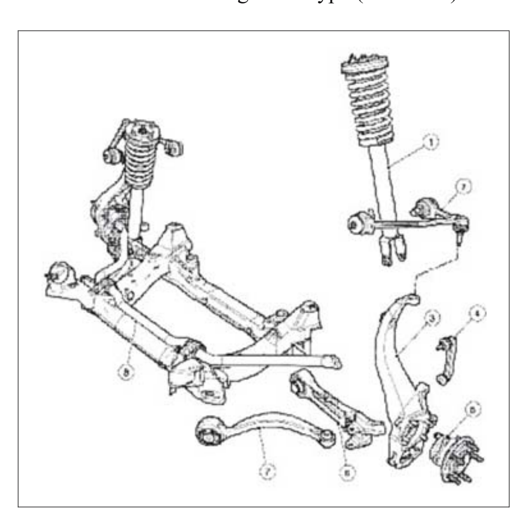


Bild 4-42: DQL-Aufhängung mit 2-teiligem unterem Lenker (Vorderachse Jaguar S-Type, Bj. 2000).

Noch interessanter ist es, wenn die beiden Lenker kein gemeinsames Gelenk besitzen; dann lässt sich auch die Lenkachse beliebig verschieben, weil diese durch den fiktiven Schnittpunkt beider Lenker verläuft. Als Beispiel ist die aufgelöste untere Ebene bei der DC S-Klasse Vorderachse zu nennen (**Bild 4-43**). Diese Anordnung mit zwei dicht nebeneinander liegenden Kugelgelenken (Doppelgelenk) benötigt jedoch viel Platz in der Felge und erschwert die freie Auslegung.

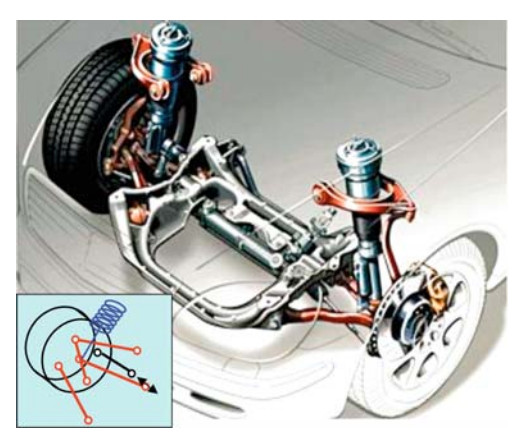


Bild 4-43: DQL-Aufhängung mit aufgelöstem unterem Lenker (Vorderachse DC S-Klasse, Bj. 1997)

4.3.6.3 Trapezlenkeraufhängung (Integrallenker)

Wenn in der unteren Lenkerebene ein Trapezlenker angeordnet wird, bleiben nur noch zwei Freiheitsgrade zu eliminieren, indem zwei 2-Punkt-Querlenker, einer oben und der andere in der Mitte angeordnet wird. Hier hat man natürlich das Problem der Realisierung der Bremsmomentabstützung. Dies wird in der Integralachse der 7er BMW (Bj. 2001) durch Anbringung eines kurzen, senkrechten Zusatzlenkers (Zwischenkoppel) zwischen dem Trapez und des Spurlenkers gelöst (**Bild 4-44**). Da jetzt dieser Lenker eine drehsteife Kette zwischen den beiden Lenkern bildet, kann das Gummilager des Trapezlenkers am Aufbau zum Zwecke der Längsfederung sehr weich gestaltet werden. **Bild 4-45** zeigt eine ähnliche Trapezlenker-Hinterachse (Audi A4, Bj. 2002).



Bild 4-44: Trapezlenkeraufhängung mit Integrallenker (Hinterachse 7er BMW, Bj. 2001)

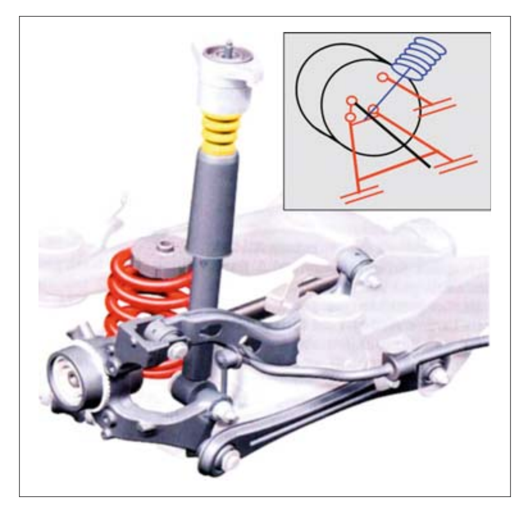


Bild 4-45: Trapezlenkeraufhängung mit Spurstabilisierung (Hinterachse Audi A4, Bj. 2002)

4.3.6.4 Zwei Längs- und zwei Querlenker

Zwei fast parallel laufende Längslenker übernehmen die Aufgabe der Aufnahme der Längskräfte und der Radfederung und die zwei Querlenker sowie die Seitenwelle stützen das Rad gegen Querkräfte und kontrollieren den Sturz- und Spurwinkel (**Bild 4-46**). Die Federung übernimmt die quer angeordnete Kunststoff-Blattfeder (Chervrolet Corvette).

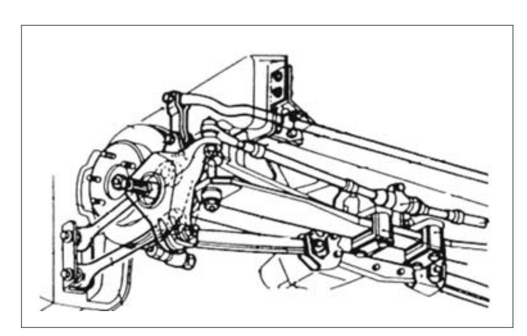


Bild 4-46: 2 Längs- und 2 Querlenker (Corvette, Bj. 1960)

4.3.6.5 Ein Längs- und drei Querlenker

Eine gängige Ausführung der Mehrlenkerachse besteht aus einem Längs- und drei Querlenkern, von denen zwei in der unteren und der dritte in der oberen Ebene angeordnet sind.
Diese Aufhängung ist mit der Einführung an der Focus Hinterachse 1999 unter dem Namen Schwertlenkerachse bekannt geworden (**Bild 4-47**).
Der Radträger ist mit einem Schwert in Längsrichtung drehbar mit dem Aufbau verbunden. Das Schwert ist am Radträger befestigt, ist allerdings elastisch (gehärtetes Blech), um die Spur- und Sturzänderungen, bedingt durch die anderen Lenker, zuzulassen. Drei quer angeordnete Lenker, einer oben und zwei unten, nehmen die Querkräfte auf.

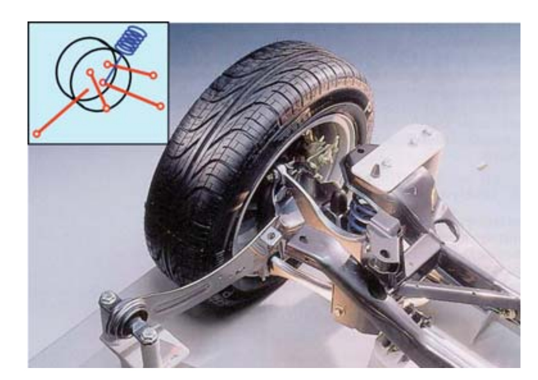


Bild 4-47: Schwertlenker-Hinterachsaufhängung mit einem Längs- und drei Querlenker (Hinterachse Ford Focus, Bj. 1999)

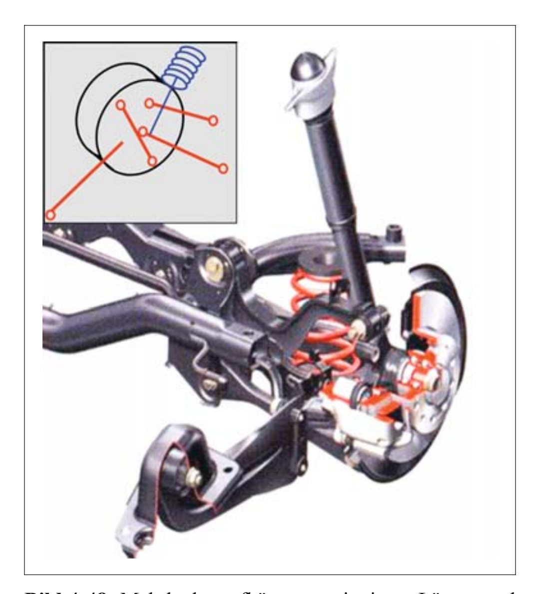


Bild 4-48: Mehrlenkeraufhängung mit einem Längs- und drei Querlenkern (Hinterachse VW Golf V, Bj. 2002)

Bild 4-48 zeigt die Ausführung in dem aktuellen VW Golf. Der elastisch gelagerte Längslenker nimmt die Längs- und Brems- bzw. Anfahrkräfte auf, weil er mit einem senkrechten Bolzen drehbar am Radträger angebunden ist. Den Nickpol bildet das aufbauseitig elastisch angebrachte Lager. Die unteren parallel angeordneten Querlenker bestimmen die Spur und sind ungleich lang; bei einer negativen Längskraft wird die Nachspur, die durch die Gummilagerelastizitäten

entsteht, kompensiert, weil der kürzere Lenker das Rad nach innen zieht [8]. Auch beim Einfedern zieht dieser Lenker das Rad in Richtung mehr Vorspur. Eine ähnliche 4-Lenkeranordnung weist die Hinterachse des Honda Accord auf (**Bild 4-49**).

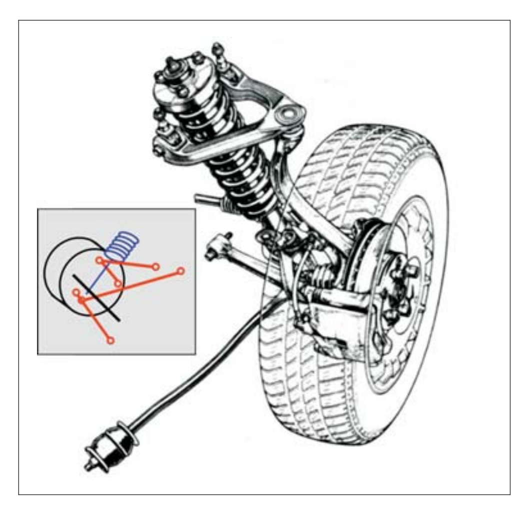


Bild 4-49: Honda Accord Vorderachsaufhängung, Bj. 1986

Die angetriebene Hinterachse des Mazda 929 von 1988, die unter den Namen E-Link bekannt ist, hat ebenfalls einen Radträger als Längslenker und 3 Querlenker, die fast parallel zueinander verlaufen und Kugelgelenke als Verbindung zum Radträger aufweisen. Die Gummilager zum Aufbau haben asymmetrische Kennlinien. Das vordere reagiert elastisch bei Kräften nach innen und steif bei Kräften nach außen. Der hintere genau umgekehrt. Hierdurch ergibt sich bei Querkräften, sowohl nach innen als auch nach außen immer eine Nachspur (**Bild 4-50**).

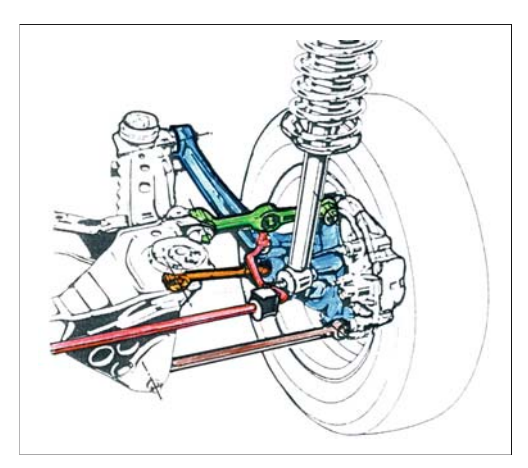


Bild 4-50: E-Link-Mehrlenkeraufhängung mit einem Längs- und drei Querlenkern (Hinterachse Mazda 929)

4.3.6.6 Ein Schräg- und drei Querlenker

Ein Nachteil bei den Mehrlenkerachsen mit Längslenker ist die Anbindung des Längslenkers direkt an der Karosserie, wodurch Geräuschprobleme entstehen können und eine volle Vormontage aller Lenker an den Achsträger nicht möglich ist. Deshalb positionieren einige Hersteller diesen Lenker schräg statt längs und lagern direkt auf dem Achsträger. Volvo bevorzugt diese Anordnung bei allen seinen Hinterachsen, die einen großen Achsträger aus Aluminium besitzen. An dem Achsträger wird gleichzeitig das Hinterachsgetriebe befestigt. Oberer Querlenker ist weiterhin ein 3-Punkt-Lenker und die drei restlichen sind 2-Punkt-Lenker. Der Federdämpfer stützt sich auf den unteren Querlenker. Der vordere obere Lenker ist schräg angeordnet und weich gelagert, um die notwendige Längselastizität zu ermöglichen (**Bild 4-51**).

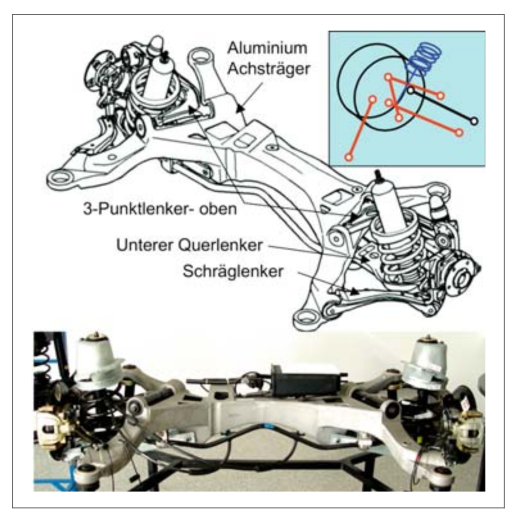


Bild 4-51: Mehrlenkeraufhängung mit einem 3-Punkt-Lenker und drei 2-Punkt-Lenkern (Volvo S80, Bj. 1998)

4.3.7 Einzelradaufhängungen mit fünf Lenkern

4.3.7.1 Fünflenker-Vorderachsaufhängung (mit zwei aufgelösten 3-Punkt-Lenkern der DQL)

Geht man noch einen Schritt weiter und löst auch den oberen Lenker auf, so hat man fünf 2-Punkt-Lenker; so genannte Raumlenker für die Hinterachse oder Vierlenker plus Spurstange für die Vorderachse. Dadurch wird eine frei im Raum liegende, virtuelle Lenkachse realisiert, die zuerst von Fritz Oswald 1958 patentiert wurde und 1994 zum ersten Mal bei einem Serienauto Realisierung fand (Audi A8). Dieses Konzept wurde dann von Audi auch auf die Mo-

delle A4 und A6 sowie auf den VW Passat übertragen und ist immer noch im Einsatz (außer beim Passat).
Die virtuelle Achse des A4 (**Bild 4-52**) wird durch die vier Schnittpunkte der Querlenkerrichtungen festgelegt. Dadurch wird erreicht, dass wegen des kleinen Lenkrollradius, die Lenkachse sehr nah zur Radmitte verläuft. So werden die Einflüsse der Antriebs-, Brems- und Unwuchtkräfte an die Lenkung stark reduziert, weil der Störkrafthebelarm nun sehr klein gehalten wird. Beim Einlenken der Vorderräder wirkt, trotz dieser steilen Spreizachse, jederzeit ausreichend Rückstellmoment auf die Lenkung.
Bei einer kompletten Auflösung beider 3-Punkt-Lenker müssen diese drehbar zueinander gelagert sein, radträgerseitig mit Kugelgelenken und aufbauseitig mit Gummilagern, die dann größere kardanische Bewegungen zulassen müssen, ohne dabei ihre Steifigkeit in der Hauptbelastungsrichtung zu mindern. Deshalb sind solche Auslegungen aufwendiger und teurer. Die Drehbarkeit der einzelnen Lenker muss zudem bei der Raumaufteilung der Aufhängung in allen Radpositionen berücksichtigt werden. Zusätzlich sind die Lenker für mehrere unterschiedliche Belastungsfälle auszulegen, da sie einen sehr komplexen räumlichen Bewegungsablauf vollziehen.

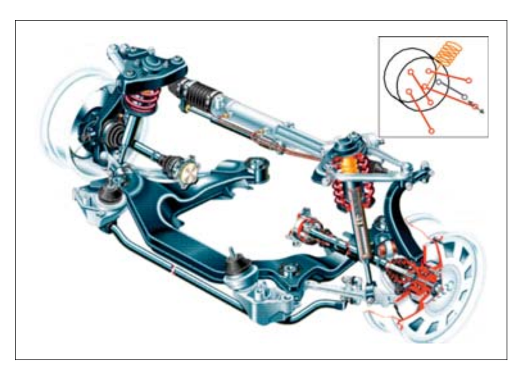


Bild 4-52: Mehrlenkeraufhängung mit fünf Querlenkern (einer ist die Spurstange) (Vorderachse Audi A4, Bj. 1999)

4.3.7.2 Fünflenker-Hinterachsaufhängung (Raumlenker)

Für die Hinterachse setzt man fünf voneinander unabhängige, räumlich zwischen Radträger und Achsträger verteilte 2-Punkt-Lenker ein, wenn man das ganze kinematische Auslegungspotenzial ausnutzen will. Zwei obere und zwei untere, jeweils in Draufsicht gegeneinander angestellte Querlenker, übernehmen die Seiten- und Längskräfte. Der fünfte (Spur-)Lenker, etwa in der Höhe der Radachse, bestimmt im Wesentlichen den Spurwinkel und dürfte in der neutralen Achse der elastischen Sturzänderungen bei Seitenkraft liegen. Die bekannteste Raumlenkerachse ist die von Mercedes C190 aus 1985 (**Bild 4-53** in der M-Klasse).

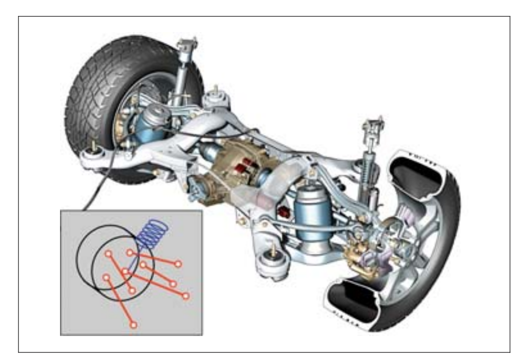


Bild 4-53: Raumlenkeraufhängung (Hinterachse DC M-Klasse, Bj. 2005)

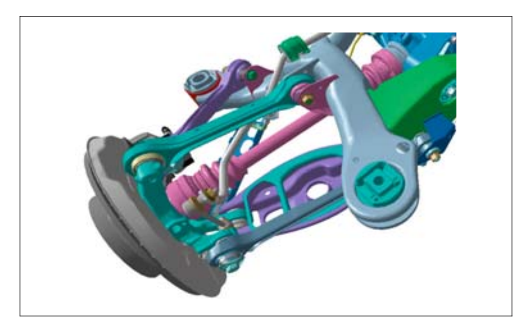


Bild 4-54: Fünflenkeraufhängung (Hinterachse des 3er BMW E90, Bj. 2005))

In den aktuellen 1er- und 3er-Modellen des BMW sind ebenfalls Fünflenker-Hinterachsaufhängungen eingebaut. Damit hat BMW das Konzept der bis dahin eingebauten Zentrallenkeraufhängung verlassen, um das größere Optimierungspotenzial des Raumlenkers auszunutzen (**Bild 4-54**).
In der Mercedes S-Klasse (W220, Bj. 1997) kreuzten sich die beiden oberen Querlenker. So entstand eine ideelle Spreizachse, geneigt zur Fahrzeuginnenseite. Dadurch lässt sich eine gezielte Abstimmung der elastischen Lenkwinkel beim Bremsen und Anfahren realisieren (**Bild 4-55**).

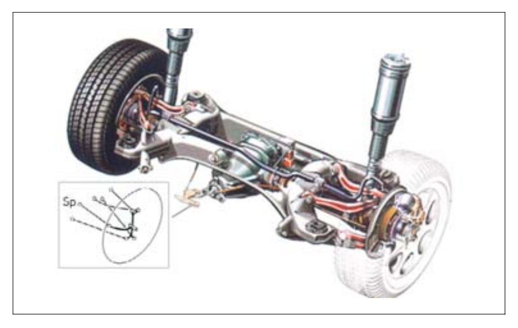


Bild 4-55: Mehrlenkeraufhängung mit gekreuzten oberen Lenkern (Hinterachse DC S-Klasse W220, Bj. 1997)

Die Vorteile der Fünflenker-Radaufhängungen sind:

- gezielte Auslegung der kinematischen und elastokinematischen Eigenschaften ohne Kompromisse,
- geringe, ungefederte Massen (keine Biegekräfte an den Lenkern),
- geringe Anbindungskräfte zum Aufbau hin,
- Freiraum in der Radmitte für die Seitenwellen.

Die Nachteile dagegen sind:

- großer Raumbedarf,
- aufwendige Konstruktion und Abstimmung,
- hohe Nebenfederraten, viele Gummilager,
- Längsfederung schwieriger zu realisieren,
- unbedingt ein Achsträger notwendig.

In einer Patentanmeldung [10] von BMW wird die optimale Anordnung der fünf Lenker für die Hinterachse wie folgt beschrieben: Es sollten zwei Lenker oben, zwei unten und die fünfte als „Spurstange" auf der Radmittelpunktebene, hinter der Radmitte mit einer Pfeilung von 3° bis 10° angestellt angeordnet sein (**Bild 4-56**).

Diese Spurstangenanordnung ermöglicht einen langbauenden Lenker, der toleranzunempfindlich ist und geringe Kardanik bzw. Torsion verursacht. Dies lässt wiederum die Anwendung kostengünstigen Gummilager statt Kugelgelenke zu. Die kurzbauender oberen beiden Lenker sollten in Fahrtrichtung vor dem Feder-/Dämpferelement liegen, um den Bauraum optimal zu nutzen. Die radträgerseitigen Anlenkpunkte der oberen und unteren Lenker werden höhenversetzt angeordnet. Weder die beiden oberen noch die unteren Lenker dürfen jeweils eine gemeinsame Ebene beschreiben.

Die höhenversetzte Anbindung ermöglicht, die Lenker besonders nahe zueinander am Radträger anzulenken, was für die Erzeugung der optimalen Spreizachse von Bedeutung ist.

4.3.8 Federbein-Einzelradaufhängungen

Feder- und Dämpferbeinaufhängungen (*Strut and Links Suspension*) gelten als eigenständige Aufhängungsart, weil hier im Gegensatz zu den bisherigen Arten ein anderer Gelenktyp zum Einsatz kommt, nämlich ein Drehschubgelenk. Das Drehschubgelenk lässt sowohl die translatorische als auch die rotatorische Bewegung einer Achse zu und wird gleichzeitig als stehender Dämpfer (Zweirohrdämpfer) benutzt. Das Dämpferrohr wird fest mit dem Radträger verbunden und die Kolbenstange drehbar am Aufbau befestigt. Damit gehen die Aufbaukräfte über die Kolbenstange-Kolben-Dämpferrohr-Radträger direkt an die Räder. Der Dämpfer ersetzt zwei 2-Punkt-Querlenker. Wegen ihrer einfachen und Platz sparenden Bauweise und der großen Abstützbasis am Aufbau, d.h., des niedrigen Niveaus ihrer Reaktionskräfte, ist diese Aufhängungsart sehr verbreitet. Sie behauptet sich nicht nur bei Pkw, sondern auch bei leichten Lkws.

Wenn der Dämpfer den Freiraum in der Schraubenfeder ausnutzt und gleichzeitig die beiden Enden der Feder abstützt (unten am Federteller, oben am Federbeinlager), spricht man von einem *Federbein*, wenn die Feder nicht auf den Dämpfer montiert ist, von einem *Dämpferbein* (**Bild 4-57**). Diese sind teurer und benötigen einen größeren Einbauraum.

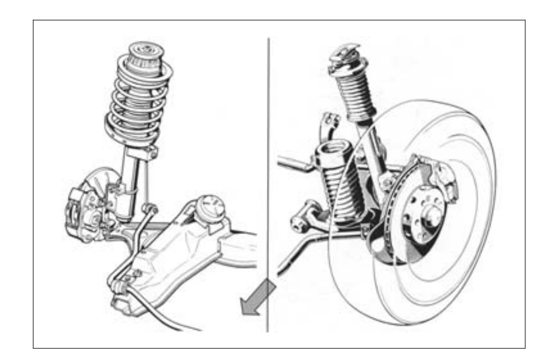


Bild 4-57: Federbein-Radführung (links) und Dämpferbein-Radführung (rechts, Feder und Dämpfer getrennt)

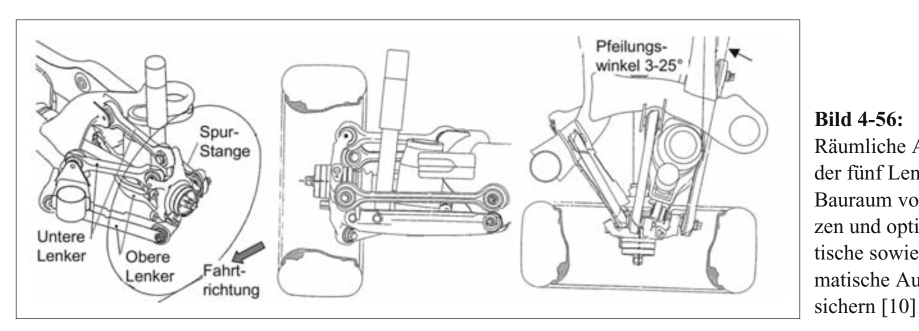


Bild 4-56: Räumliche Anordnung der fünf Lenker um den Bauraum voll auszunutzen und optimale kinematische sowie elastokinematische Auslegung zu sichern [10]

Die Seitenkräfte, die durch die Federabstützung entstehen, belasten die Kolbenstange auf Biegung und verursachen damit eine höhere Reibung. Sie werden deutlich reduziert, indem seitenkraftausgleichende Federgeometrien und reibungsminimierende Kolbenbeschichtungen eingesetzt werden. Damit zeigt das Ansprechverhalten der Federung, gegenüber anderer Arten der Radführung, keinen großen Nachteil mehr. Obwohl diese Aufhängungsart bereits 1948 bei Ford Agila als „McPherson" in die Serie eingeführt wurde, hat seine Verbreitung als wirtschaftlichste Vorderachskonstruktionen erst nach den siebziger Jahren eingesetzt.
Zur Vervollständigung der Aufhängung brauchen Feder- oder Dämpferbeinaufhängungen noch drei 2-Punkt-Lenker; einer in der Mitte als Spurlenker und die beiden anderen an der unteren Ebene zum Führen des Rades (Führungslenker). Die beiden unteren 2-Punkt-Lenker werden meist zu einem 3-Punkt-Lenker zusammengefasst um Kosten zu sparen.
Bei einer modernen McPherson-Aufhängung wird die Feder oberhalb des Rades räumlich schräg und exzentrisch zur Kolbenstange angestellt. Der sichelförmige 3-Punkt-Lenker ist vorn mit einem Kugelgelenk am Radträger befestigt, welches ihm in der Draufsicht eine definierte Drehbewegung erlaubt (**Bild 4-58**).

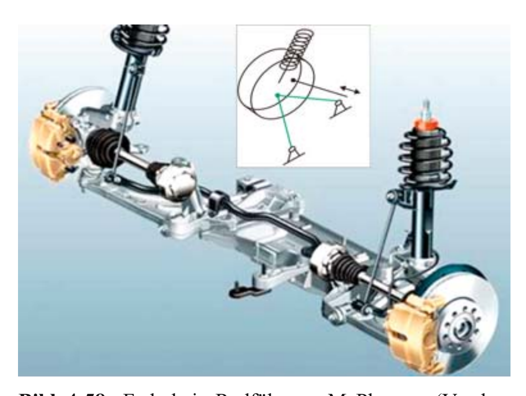


Bild 4-58: Federbein-Radführung McPherson (Vorderachse VW Golf 5, Bj. 2003)

In der Verlängerung der Radmittelachse ist der Lenker mit einem steifen Gummilager, das jedoch Kardanik zulässt, am Aufbau oder Hilfsrahmen befestigt, der die Querkräfte aufnimmt. Am langen Arm der 3-Punkt-Lenker, der nach hinten oder vorne zeigen kann, ist dagegen ein weiches, großvolumiges Gummilager angeordnet, der die Längsfederung des Rades zulässt und der Abrollhärte entgegen wirkt, wobei eine richtig gewählte Pfeilung der Spurstange gegenüber dem Querarm des Lenkers für das gewünschte Eigenlenkverhalten sorgt. Die Zahnstangenlenkung sollte etwa in Höhe des Querlenkers vor der Achse liegen, um ein untersteuerndes Anlenkverhalten sicherzustellen.

Eine optimale Lenkerauslegung erreicht man, wenn das harte Lager in Längsrichtung 10 bis 15 mm hinter oder vor dem Kugelgelenk liegt, um bei kleinen Längsfederungen Seitenkraftstöreffekte zu vermeiden (**Bild 4-66**).
Die Forderung nach einem kleinen oder gar negativen Lenkrollradius ergibt Einbauprobleme zwischen der Bremse und dem Kugelgelenk, weshalb es zweckmäßig sein kann, durch die Auflösung des 3-Punkt-Lenkers eine ideale Spreizachse zu schaffen. Die aufgelösten unteren Lenker der Vorderachse wurden erstmals beim 5er und 7er BMW verwendet. Dadurch wurden nicht nur die Wechselwirkungen der Quer- und Längsdynamik vermieden und der untere Lenkachsendrehpunkt nach außen verlegt, sondern auch die Bauraumprobleme gelöst. Die Spurstange des vorne liegenden Lenkgetriebes verläuft fast parallel zum Querlenker, um eine hohe Spurtreue bei Längseinfederung des Rades zu gewährleisten. BMW konnte mit dieser Auflösung sehr lange Zeit dem kosten- und platzsparenden Federbein-Konzept treu bleiben, ohne dabei dessen Nachteile in Kauf nehmen zu müssen (**Bild 4-59**).

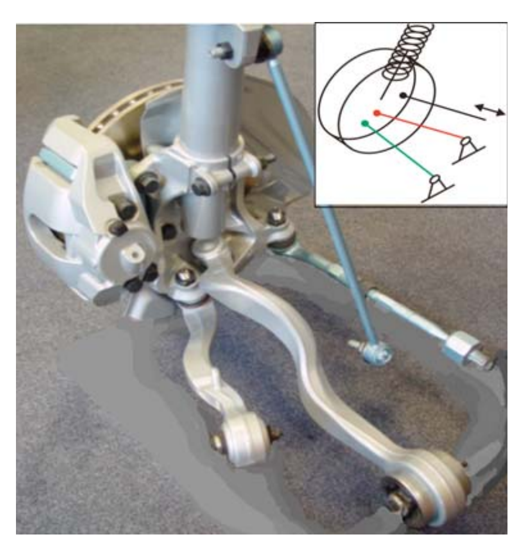


Bild 4-59: Federbein-Radführung mit aufgelösten unteren Lenkern (Vorderachse 5er BMW, Bj. 1988)

Die Vorteile der Feder-/Dämpferbeinaufhängung sind:

- alle Federungs- und Führungsteile können in einem Bauteil zusammengefasst werden,
- benötig wenig Platz in der Breite (Raum für quer angeordneten Antriebsaggregate),
- sehr kosten- und gewichtssparend,
- lange Federwege leicht realisierbar.

Beim Dämpferbein zusätzlich:

- geringere, ungefederte Masse,
- keine Wälzlagerung des Dämpferlagers,
- Dämpferübersetzung näher zu 1:1,

- günstige Unterbringung der Schraubenfeder, größere Führungslänge möglich,
- günstigere Knautschzone,
- reparaturfreundlicher als Federbein.

Die Nachteile dagegen sind:

- an den Vorderachsen ungünstigere kinematische Eigenschaften gegenüber Doppelquerlenker,
- Hochkräfte werden direkt am Radkasten eingeleitet, die entsprechend verstärkt werden muss,
- schwierige Isolation der Fahrbahngeräusche,
- geringe Bremsnickabstützung,
- Reibung an der Kolbenstange verursacht Verschleiß und hochfrequente Schwingungen,
- Empfindlichkeit der Vorderachse gegen Reifenunwucht und Radlaufabweichungen,
- beim Dämpferbein werden Federkräfte über den unteren Lenker an den Radträger geleitet; Lenker und Kugelgelenk deutlich höher belastet.

Bild 4-60 zeigt das Eigenschaftsprofil für die Federbeinaufhängung.

Die Anordnung der radführenden Feder-/Dämpferbeinaufhängungen für die Hinterachse ist ähnlich, mit dem Unterschied, dass man hier als Anbindung zum Radträger kein Kugelgelenk braucht und die Kolbenstange in Zylinderrohr keine Drehbewegungen mehr machen muss. Außerdem lassen sich die unteren Querlenker sehr lang, bis zur Fahrzeugmitte gestalten, um die Spurweiten- und Sturzänderungen zu minimieren, so dass dies bei Beladung ein weniger stark absinkendes Wankzentrum zur Folge hat.

Neben dem Federbein braucht man entweder drei 2-Punkt-Lenker oder einen 3-Punkt- plus einen 2-Punkt-Lenker. Einer der Lenker ist immer (schräg gepfeilt) in Längsrichtung nach vorn als Zugstrebe oder nach hinten als Druckstrebe gerichtet und übernimmt die Längskräfte. Wegen des Abrollkomforts ist er mit einem weichem Gummilager am Aufbau befestigt.

Wenn der untere Querlenker aufgelöst und einer davon am anderen gelagert wird, braucht man nur noch einen Längslenker (**Bild 4-61**). Somit hat man eine sehr einfache, kostengünstige Ausführung mit viel Freiraum zwischen den Rädern.

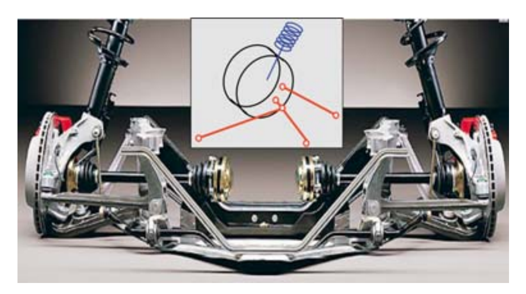


Bild 4-61: Federbeinaufhängung mit je einem Längs- und Querlenker (Hinterachse Porsche Boxter S, Bj. 2002)

Die Federbeinaufhängungen eignen sich für die Hinterachsen mit und ohne Antrieb und sind wegen den sehr einfachen Lenkern relativ kostengünstig herzustellen (**Bild 4-62**). Da das Lenken des Rades hier nicht benötigt wird, werden an der unteren Lenkerebene statt eines 3-Punkt-Lenkers, zwei 2-Punkt-Lenker, einer in Längs- und der andere in Querrichtung angebracht. Der dritte, parallel zum Querlenker angeordnete Lenker verhindert das Drehen des Federbeins. Diese im Englischen *Strut and Links* genannte Aufhängung ist in den USA sehr populär und wurde statt der Verbundlenkerachsen in Europa und Japan eingesetzt.

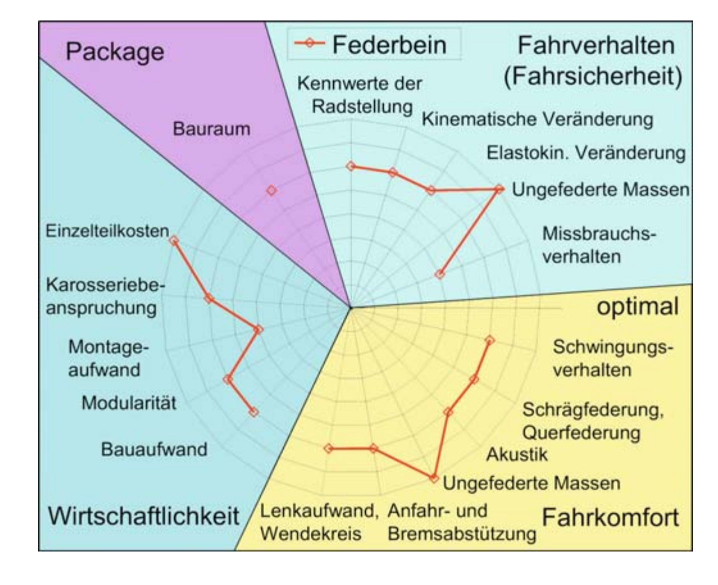


Bild 4-60: Eigenschaftsprofil für die Federbeinaufhängungen[2]

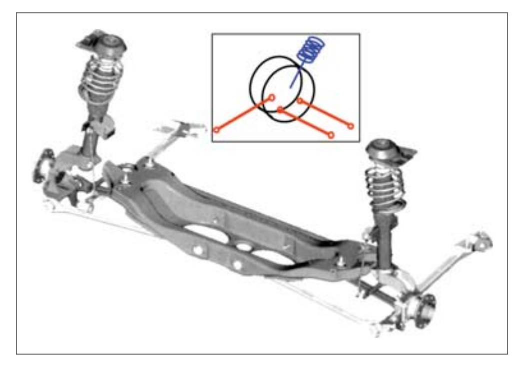


Bild 4-62: Federbein mit zwei quer und einem längs angeordneten 2-Punkt-Lenkern (Hinterachse Ford Mondeo, Bj. 2000)

Will man jedoch die Vorteile der Elastokinematik ausnutzen und die durch die weiche Lagerung der Längsachse entstehende Längsverschiebung des Rades ohne Spuränderungen erreichen, müssen Doppel-2-Punkt-Lenker parallel nebeneinander angeordnet ein Viergelenkgetriebe bilden. Dann wirken die gegenseitig ausgelegten Gummilagersteifigkeiten der beiden aufbauseitigen Verbindungen derart, dass das Rad bei der Längsbewegung gezielt in Vor- bzw. Nachspur geht (*Twin Trapezoidal Link*, Mazda 323, 626), **Bild 4-63**.

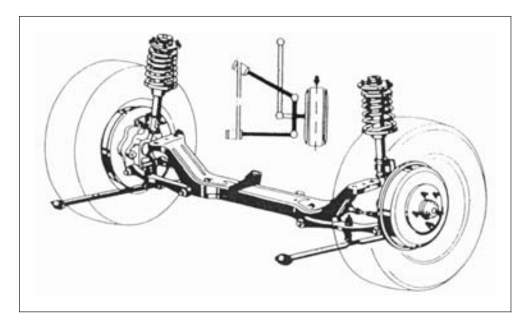


Bild 4-63: Twin Trapezoidal Link (Hinterachse Mazda 626)

4.4 Einzelradaufhängungen der Vorderachse

Die Auswahl der Aufhängungskonzepte für die Vorder- und Hinterachse weichen voneinander ab, weil die Anforderungen und Gegebenheiten der beiden sehr unterschiedlich sind. Der Einsatz der beschriebenen Radaufhängungskonzepte für die Vorder- und Hinterachsen sind deshalb separat zu behandeln.

4.4.1 Forderungen an die Vorderachsaufhängungen

Die Radaufhängung sorgt für die Übertragung der Brems-, Antriebs- und Seitenkräfte sowie die präzise Führung des Rades gegenüber dem Aufbau. Sie hat damit eine Doppelfunktion von Kraft- und Bewegungsübertragung:

- Zuerst muss die Radaufhängung die Stellung des Rades zum Aufbau und zur Strasse bei allen Fahrsituationen und auftretenden Kräften so halten, dass die Fahrtrichtung nicht gestört wird.
- Sie muss die ungewünschte (Hub-, Wank- und Roll-)Bewegungen des Aufbaues unterbinden.
- Sie muss die Kräfte so übertragen, dass die Reaktionszeit beim Beschleunigungs-, Brems- und Lenkvorgang sehr kurz ist (hohe Steifigkeit).
- Sie muss die Weiterleitung der Schwingung und Stöße, die vom Rad kommen verhindern (isolieren).
- Die Konstruktion der Radaufhängung hat Crashanforderungen zu berücksichtigen. Anbindungspunkte an den Längsträgern dürfen die Energieaufnahme nicht behindern.
- Achsbauteile sollen sich bei hohen Belastungen plastisch verformen aber nicht brechen. Die Radführung und Lenkbarkeit bleibt so auch bei Missbrauch oder Unfallsituation möglichst erhalten.
- Die erforderlichen Radräume unter Berücksichtigung möglichst großer Lenkeinschläge für einen kleinen Wendekreis sind im Rahmen des Fahrzeugpackage möglichst gering zu halten.
- Störungen durch Drehmomentschwankungen, Bremsscheibentoleranzen, Unwuchten, ESP-Wirkung als auch Fahrbahnunebenheiten sind von der Lenkung fernzuhalten.
- Die Lenkkinematik muss für eine schnelle, gleichmäßige Lenkradrückstellung sorgen.
- Sie muss in den Kurven ein untersteuerndes bis neutrales Eigenlenkverhalten aufweisen.
- Ungleiche Reibwerte am linken und rechten Rad dürfen nicht zu unangemessenen Lenkmomenten führen und den Fahrer beim Ausregeln möglichst unterstützen.
- Sie muss in allen Fahrsituationen ein direktes Gefühl zur Straße vermitteln. Geringe Reibung und Elastizitäten sind anzustreben.

Die Einzelradaufhängungen der Vorderachse müssen lenkbar sein. Die heute üblichen Zahnstangenlenkungen haben eine parallel zur Radmitte angeordnete Achse, in der die Zahnstange nach rechts oder nach links bewegt wird. Die Lenkungslenker, die „Spurstangen“ heißen, verbinden die Zahnstange mit den beiden Radträgern; nach innen zur Zahnstange mit einem Axialkugelgelenk und nach außen zum Rad-

träger mit einem Winkelkugelgelenk. Die Gelenkmittelpunkte bestimmen die Lenkkinematik. Die Eigenschaften der Lenkung dominieren die Auslegung jeder Vorderachse.
Wichtig dabei ist die Anordnung der genannten Gelenkpunkte derart, dass die Ackermanngesetze berücksichtigt werden, die Spur und Spurweite sich innerhalb des gesamten Bewegungsraums des Rades nicht unzulässig ändern, die Toleranzen die Lenkeigenschaften nur geringfügig beeinflussen und der Lenkstrang zwischen Rad und Zahnstange möglichst steif bleibt.
Das Lenkgetriebe kann vor oder hinter der Achse und jeweils oberhalb oder unterhalb der Achsmittellinie angeordnet sein. Eine günstige Anordnung – wenn der Bauraum es zulässt – ist aus elastokinematischen Gründen vor der Achse und aus Steifigkeitsaspekten in Höhe der unteren Lenkerebene. Die Montagetoleranzen, die die Höhe der Zahnstangenmittelachse beeinflussen, müssen sehr eng gewählt werden.
Die Auswahl des Aufhängungskonzepts für die Vorderachsen wird bestimmt durch folgende Faktoren:

- Anordnung des Antriebsaggregates (Front/Heck, Längs/Quer, Motor/Getriebe),
- Antriebsart (angetrieben, nicht angetrieben),
- Motorgröße (4-, 5-, 6-, 8-Zylinder, Reihen-, V-Anordnung),
- Fahrzeugklasse (Mini-, Klein-, Mittel-, Luxus-, SUV-, Sportklasse).

Weite Verbreitung hat die McPherson-Aufhängung als Vorderachse gefunden (in 2005 weltweit 78 %) gefolgt von der Doppelquerlenkerachse (20 %). Alle restlichen Aufhängungsarten machen gerade 2 % der weltweit 62 Millionen gebauten Fahrzeugen aus.
75 % dieser Fahrzeuge haben einen Frontantrieb. Hier liegt die Einsatzquote der McPherson-Aufhängung sogar bei 90 % (**Bild 4-64**).
Bei den nicht angetriebenen Vorderachsen dagegen ist Doppelquerlenker mit 53 % häufiger als McPherson mit 39 %. Die Mehrlenkerachsen findet man mit 15 % ausschließlich (Ausnahme Audi A4/6/8) bei nicht angetriebenen Vorderachsen, jedoch insgesamt nur 1 % bei allen Vorderachsen.

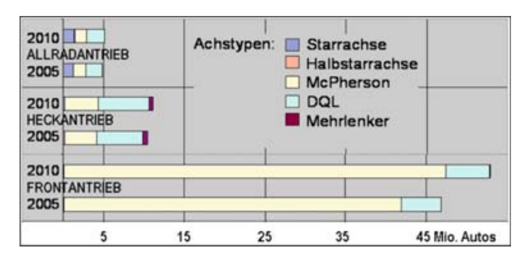


Bild 4-64: Anteile der Vorderachstypen (Allrad, angetrieben und nicht angetrieben) weltweit in den Jahren 2005 und 2010

Die Starrachse wird nur noch zu 1,4 % an den Vorderachsen bevorzugt, davon 0,8 % bei den Allradfahrzeugen (Die starre Vorderachse ist immer noch in 12 % der Allradfahrzeugen zu treffen, wobei die Allradfahrzeuge lediglich 6,7 % der Gesamtfahrzeuge ausmachen).

4.4.2 Komponenten der Vorderachse

Neben der Aufhängung gehören die Lenkung, Federung/Dämpfung, Radlagerung und in der Regel ein Hilfsrahmen, gegebenenfalls mit Hilfsrahmengummilager, zu Komponenten der Vorderachse. Häufig wird auch die Lenksäule hinzugezählt. Das Antriebsaggregat wird gerne auf dem Hilfsrahmen mit 2 bis 3 Gummilagern (meist Hydrolager, zum Teil sogar regelbar) befestigt. Diese gehören ebenfalls zu den Komponenten der Vorderachse.

4.4.3 Bauarten der Vorderachse

Wie die Auswertung des Jahres 2005 zeigt, sind vor allem zwei Bauarten für die Vorderachse von Bedeutung: McPherson und Doppelquerlenker. Das Auflösen der Dreiecksquerlenker zu Einzellenker in beiden Konfigurationen eliminiert funktionale Nachteile und führt zu weiteren Derivaten dieser Konzepte, wie 4- und 5-Lenker-Vorderachsen.

4.4.3.1 McPherson-Achse mit Verbindungstraverse

Die zunehmend höhere Motorisierung verursacht bei McPherson-Vorderachsen stärkere Belastungen der Federbeinlager, die Querkräfte und Längskräfte abstützen. Deshalb ist es zweckmäßig, die beiden Lageraufnahmen mit einer Quertraverse miteinander zu verbinden um eine erhöhte Quersteifigkeit zu erzielen. Diese Traverse lässt sich auch als zusätzlicher Motoraufhängungspunkt benutzen (**Bild 4-65**).

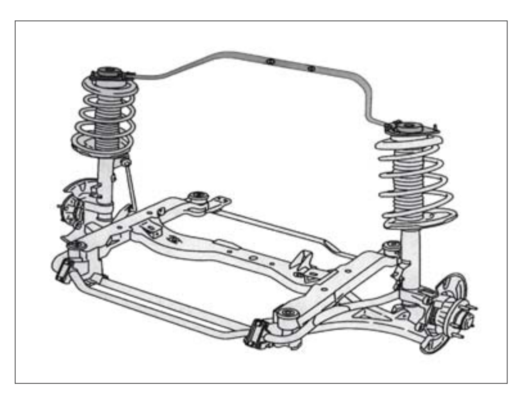


Bild 4-65: McPherson-Vorderachse mit Quertraverse

4.4.3.2 McPherson-Aufhängung mit optimiertem unteren Lenker

Die elastokinematischen Eigenschaften und damit Fahrdynamik und Abrollkomfort werden sehr stark von der Auslegung der unteren 3-Punkt-Lenker beeinflusst. Je nach Geometrie wird dieser Lenker als A- oder L-Lenker bezeichnet. Während der A-Lenker Quer- und Längskräfte jeweils über beide inneren Lagerpunkte aufnimmt, trennt der L-Lenker die Kraftaufnahme weitgehend: Querkräfte über das vordere Lager und Längskräfte über das hintere. Dadurch kann eine hohe Quersteifigkeit mit einer gleichzeitig hohen Längsnachgiebigkeit für Abrollkomfort erreicht werden. Der längere Schenkel kann außerdem so optimiert werden, dass er bei einem Crash gezielt gebogen wird, um maximal mögliche Energie aufnehmen zu können (**Bild 4-66**).

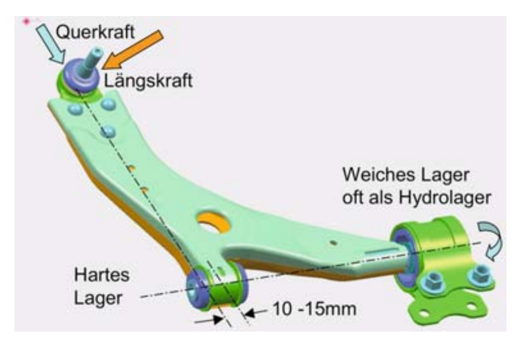


Bild 4-66: McPherson unterer 3-Punkt-Lenker

4.4.3.3 McPherson-Aufhängung mit aufgelöstem unteren Lenker

Die Forderung nach einem kleinen gar negativen Lenkrollradius ergibt Einbauprobleme zwischen der Bremse und den radseitigen Führungsgelenken, weshalb es zweckmäßig sein kann, durch die Auflösung von 3-Punkt-Lenkern die virtuelle Spreizachse zu schaffen. Wenn der untere 3-Punkt-Lenker durch zwei 2-Punkt-Lenker ersetzt wird, hat man die beiden Funktionen (Quersteifigkeit und Längselastizität) bei entsprechender Geometrieauslegung durch reine Zug-/Druckkraftübertragung voneinander getrennt. Außerdem kann der untere Punkt der Lenkachse beliebig ausgelegt werden, weil er auf dem Schnittpunkt beider Lenker liegt. Diese ermöglicht dem Konstrukteur große kinematische Auslegungsfreiheit, um die Störeinflusse auf die Lenkung zu minimieren (**Bild 4-67**).
In **Bild 4-59** sind die beiden Lenker einheitlich zu erkennen. Die extrem dicht zueinander angeordneten Kugelgelenke erschweren die räumliche Unterbringung. Dies wird durch ein „Doppelgelenk“, bei dem die Kugelmittelpunkte höhenversetzt und die Kugelzapfen entgegengesetzt orientiert sind, beseitigt.

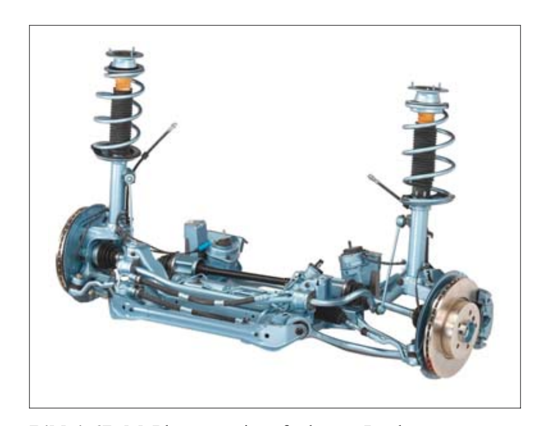


Bild 4-67: McPherson mit aufgelösten Lenkern

4.4.3.4 McPherson mit doppeltem Radträger

Bei den frontangetriebenen Fahrzeugen mit starken Motoren können große Drehmomentunterschiede zwischen den beiden Rädern entstehen. Diese stören die Lenkung und das Lenkgefühl. Die Größe des Störkrafthebelarms (senkrechter Abstand der Radmitte zur Lenkachse) ist der Hauptfaktor. Wenn er reduziert wird, werden auch die Störmomente am Lenkrad und in der Lenkung proportional vermindert.
Durch Teilung des Radträges in zwei Teile, die ineinander drehbar gelagert sind (nur ein Freiheitsgrad), wird die Drehbewegung des Federbeins nicht mehr notwendig, weil diese Aufgabe der äußere Teil des Radträgers übernimmt und damit auch die Lenkachse bestimmt. Die neue Lenkachse kann wesentlich freizügiger festgelegt werden, weil die räumlichen Einschränkungen entfallen.
Durch diese Anordnung entsteht eine Federbeinachse mit den Vorteilen der Doppelquerlenkerachse, die dann ohne Karosserieänderungen auch als Variante für die Hochmotorisierungen eingesetzt werden kann (**Bild 4-68**).

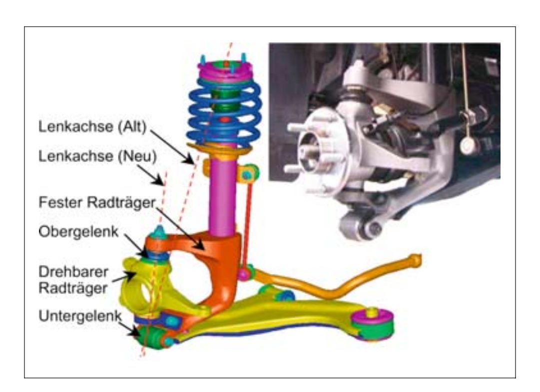


Bild 4-68: McPherson-Vorderachse mit doppeltem Radträger

4.4.3.5 Doppelquerlenker mit aufgelösten Lenker

Bei einer Doppelquerlenkervorderachse (3-Lenker) ist der Radträger über 2 übereinander angeordnete Querlenker mit jeweils einem Kugelgelenk geführt. Der obere Querlenker kann innerhalb der Felge oder für bessere Querkraftabstützung oberhalb des Rades positioniert sein. Auch in dieser Anordnung bringt die Auflösung der unteren Ebene (4-Lenker) zusätzliche Vorteile, wie bei der McPherson-Achse dargestellt.
Darüber hinaus kann auch die obere Ebene aufgelöst werden (5-Lenker), wodurch die Lenkachse noch freier definiert und der Störkrafthebelarm auf bis 10 mm reduziert werden kann (**Bild 4-69**).

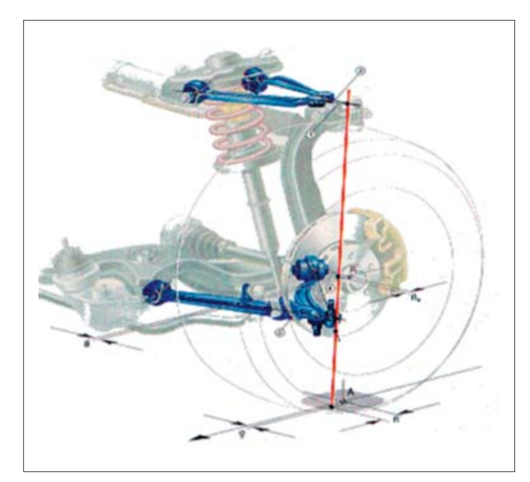


Bild 4-69: 5-Lenker-Vorderachse (Audi A4 und A8)

4.5 Einzelradaufhängungen der Hinterachse

4.5.1 Forderungen an die Hinterachse

Die Hinterachse benötigt, wenn keine Hinterradlenkung verbaut ist, keine Lenkbarkeit. Sie ist insofern einfacher auszulegen als die Vorderachse. Dagegen ist der Einfluss der Hinterachse beim Wanken, Nicken, Geradeausfahrt und Eigenlenkverhalten relativ groß. Auch die beladungsabhängigen Laständerungen sind an der Hinterachse deutlich ausgeprägter.
Beim Bremsen in den Kurven und beim Beschleunigung (Heckantrieb) dominiert der Einfluss der Hinterachse das Gesamtfahrzeugsverhalten deutlich. Von den Einbauverhältnissen her, muss die Hinterradaufhängung so schmal und flach bauen wie möglich, um größten Freiraum, mit großer Durchladebreite und tiefer Ladekante zu erreichen.
Eine weitere Herausforderung bei den Hinterradaufhängungen ist die Sicherstellung, dass viele unterschiedliche Modellvarianten (Limousine, Kombi, Coupe, Cabriolet usw.) und Antriebsvarianten (Front-, Heck-, Allradantrieb) mit möglichst wenigen Änderungen an der Achse zu realisieren sind.

4.5.2 Komponenten der Hinterachse

Neben den Aufhängungskomponenten, Federung, Dämpfung, Radträger, Radlagerung gehören Hilfsrahmen mit seiner Lagerung (bei den Starr- und Halbstarrachsen sowie einigen nicht angetriebenen Einzelradaufhängungen braucht man keinen Hilfsrahmen), Ausgleichsgetriebe und Seitenwellen samt ihre Aufhängung zu den Komponenten der Hinterachse.

4.5.3 Bauarten der Hinterachse

Wie die Auswertung des Jahres 2005 zeigt, ist die Variantenvielfalt bei den Hinterachsen deutlich größer als bei den Vorderachsen. Es sind 6 Achskonzepte, die häufig zu finden sind: Mit 26 % führen die Verbundlenkerachsen gefolgt mit jeweils 23 % Starr- und Mehrlenkerachsen. Weitere drei Konzepte sind noch von Bedeutung: Doppelquerlenker, Längslenker (jeweils 8 %) und Torsionskurbelachsen (6 %).
Schräglenker- (2,3 %) und Raumlenkeraufhängungen (1,8 %) haben von ihrer Verbreitung her eine geringere Bedeutung (**Bild 4-70**).

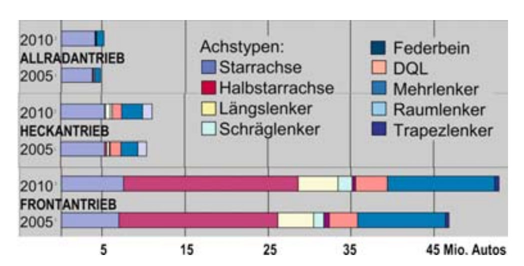


Bild 4-70: Anteil der Hinterachstypen (Allrad, angetrieben und nicht angetrieben) in den Jahren 2005 und 2010

4.5.3.1 Nicht angetriebene Hinterachse

Bei den nicht angetriebenen Hinterachsen führen die halbstarren Bauarten mit 42 % (Verbundlenker 34 %, Torsionslenker 8 %, **Bild 4-70**). Alle Kleinfahrzeugsklassen haben danach eine raum- und kostensparende Verbundlenkerachse. In der unteren Mittelklasse setzt sich die Mehrlenkeraufhängung immer mehr durch (23,5 %). Sie wird gefolgt von Starrachsen mit 12,2 % (ausschließlich bei SUVs und Light Trucks).
Für die nicht angetriebene Kleinwagen-Hinterachsen sind die halbstarren Achsen aus Nutzen/Kosten-Betrachtungen her die sinnvollste Auswahl. Sogar bei der unteren Mittelklasse werden Verbundlenkerachsen häufig verwendet (Opel Astra, Fiat Punto, Peugeot 207, Renault Clio, Toyota Auris), weil die Mehr-

kosten der Mehrlenkeraufhängungen trotz ihrer fahrdynamischen Vorteile im Markt kaum akzeptiert werden. Die aufwändigen Mehrlenkeraufhängungen haben nur ab der Mittelklasse Chancen, weil hier der Kostenaufwand nicht Hauptkaufkriterium ist. Die Starachsen sind nur bei den Frontantrieb-Versionen der allradangetriebenen großen Pkws und Transportern sowie Light Trucks wegen der deutlich höheren Belastbarkeit zu finden.

4.5.3.2 Angetriebene Hinterachse

Die Starrachsen werden bei den angetriebenen Hinterachsen mit 57 % deutlich bevorzugt (**Bild 4-70**). Diese sind absolut gesehen jedoch ein kleiner Anteil von lediglich 13 % aller Hinterachsen und beschränken sich ausschließlich auf SUVs und Light Trucks aus den nicht europäischen Ländern. Mehrlenker- (21 %) und Raumlenkerradaufhängungen (8 %) folgen die Starrachsen. In Europa bei den Mittel- und Oberklassenfahrzeugen werden fast ausschließlich diese Bauarten bevorzugt. Schließlich haben bei den angetriebenen Hinterachsen die Doppelquerlenkeraufhängungen einen Anteil von 9 %.

4.5.4 ULSAS-Benchmark für Hinterachsen

In Auftrag des IISI (*International Iron and Steel Institut*), das von den weltweit führenden Stahlherstellern unterhalten wird, hat Lotus Engineering im Jahr 2000 eine sehr umfangreiche Benchmarkuntersuchung (ULSAS-Benchmark, *Ultra Light Steel Auto Suspension*) an Mittelklasse-Fahrzeugen vorgestellt [11]. Ziel war es einerseits nachzuweisen, dass das Gewicht von 5 ausgesuchten Hinterachsen mit innovativen Stahllösungen ohne Mehrkosten um 20 % gesenkt werden kann. Andererseits sollten die Kosten von Leichtbauachsen aus Aluminium ohne Mehrgewicht um 20 % reduziert werden. Schließlich war ein Vorschlag für eine optimierte Kosten/Nutzenrelation auszuarbeiten.
Unter den 9 europäischen, 4 amerikanischen und 3 asiatischen Autos des Baujahr 1998 wurden 8 ausgesucht, die vier unterschiedliche Aufhängungskonzepte haben. Für jede Serienachse wurde eine gewichts- und kostenoptimierte Lösung entwickelt (**Bild 4-71**).
Dazu hat Lotus auch eine gewichts- und kostenoptimierte Konzeptachse ausschließlich aus Stahlbauteilen entwickelt (**Bild 4-72**). Diese Achse hat ein Federbein mit einem mit dem Radträger verbundenen Längslenker und zwei geraden Querlenkern ohne Hilfsrahmen. Sie wiegt etwa die Hälfte des Benchmarkdurchschnitts bei niedrigen Kosten (Zweitbeste im Kostenranking) und ausgewogenen technischen Eigenschaften.

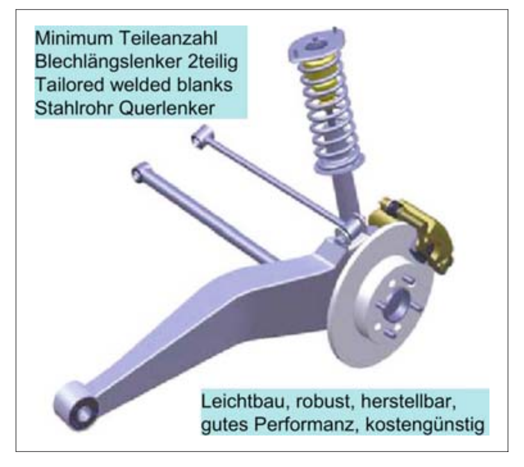


Bild 4-72: Lotus Unique Leichtbau-Hinterachse [11]

Der Umfang der Untersuchung betraf die Aufhängung einschließlich Lenker, Feder, Dämpfer, Radträger, und Radlager. Nur die Integrallenkerachse hatte einen Hilfsrahmen. Die gemessenen Gewichte und geschätzten Kosten (Material, Werkzeugkostenanteil, Montage) sowie das Gesamtergebnis zeigen **Bild 4-73** und **Tabelle 4-4**.
Diese Studie zeigt, dass eine gewichtoptimierte Aufhängung nicht unbedingt aus Leichtmetall bestehen und nicht teurer sein muss.

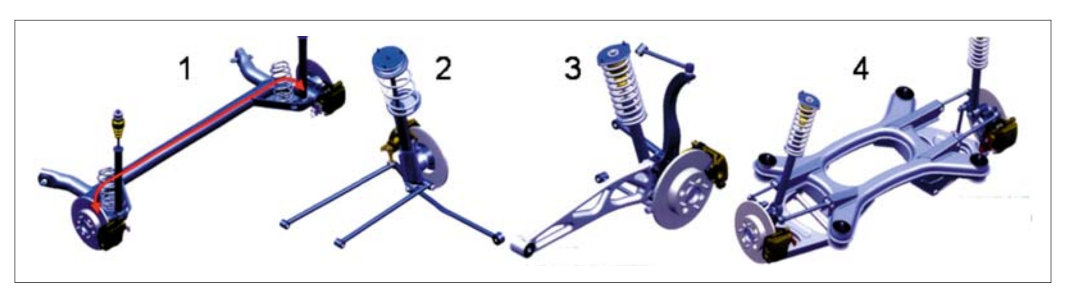


Bild 4-71: Für ULSAS-Benchmark ausgewählte Hinterachsen: 1) Audi A6-Verbundlenker, 2) Ford Taurus-Federbein, 3) Toyota Camry-Quer-/Längslenker; 4) 5er BMW-Integrallenker (alle Bj. 1998) [11]

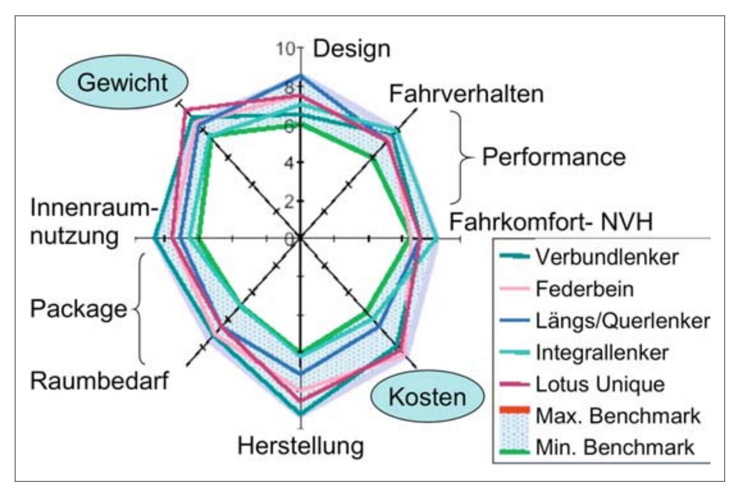


Bild 4-73:
Lotus Unique im Vergleich [11]

Tabelle 4-4: Gewichts- und Kostenvergleich (5 = bester Wert)

	Verbund-lenker	Federbein	Längs/ Querlenker	Integral-lenker	Lotus
Kosten in $	185	152	209	490	163
Gewicht in kg	34	42	40	48	27
Design	1	3	5	3	4
Fahrverhalten	4	2	2	5	3
NVH	3	2	3	5	3
Herstellung	5	3	2	1	4
Package	5	4	2	1	3

4.6 Konstruktionskatalog als Auswahlhilfe für die Achstypen

Die Konstruktionskataloge beinhalten alle bekannten Lösungen für die technischen Aufgaben mit deren für die Auswahl relevanten Eigenschaften. Die Lösungssammlung ist systematisch gegliedert. Die Eigenschaften sind für die einzelnen Lösungen unmittelbar miteinander vergleichbar, um eine möglichst objektive Auswahl zu ermöglichen [12]. Ein Konstruktionskatalog für die Achsen wird gewiss nie für die Entscheidung des Achskonzepts neuer Modelle benutzt. Er bietet aber eine sehr übersichtliche und komprimierte Sammlung aller bekannten Ausführungsmöglichkeiten samt deren Merkmalen für die Vorder- und Hinterachsen (**Tabelle 4-5**).

4.7 Gesamtfahrwerk

Das Zusammenwirken beider Achsen und deren Anpassung zueinander sowie zu den Aufbaumerkmalen (Gewicht, Länge, Breite, Antriebsaggregat, s. Abschnitt 1.3) bestimmt, wie gut das Gesamtfahrwerk funktioniert. D.h., eine gute Vorderachse mit einer ebenfalls guten Hinterachse, die jedoch nicht zueinander und zum Rest des Fahrzeugs passen, kann kein gutes, harmonisches Gesamtfahrzeug abgeben. Insofern lassen sich die beiden Achsen nie unabhängig voneinander bestimmen, auslegen und abstimmen.

4.7.1 Zusammenspiel von Vorder- und Hinterachse

Die kinematischen Eigenschaften der Vorder- und Hinterachse sind aufeinander abzustimmen, um ein harmonisches Gesamtfahrzeugverhalten zu erhalten.

FAHRZEUGACHSE	RADAUFHÄNGUNG	LENKERANBINDUNG	LENKERANZAHL	LENKERLAGE	2 PUNKTLENKER	3 PUNKT LENKER	4 PUNKT LENKER	DREHSCHUBLENKER	FESTLENKER	SPURSTANGE	BEZEICHNUNG	SONST. NAMEN	LAUFENDE NUMMER
GLIEDERUNGSTEIL											HAUPTTEIL		
Vorderachse	Starr	unmittelbar	1	L	-	-	-	-	-	1	STARRACHSE	Abhängige Radführung	V1
Vorderachse	Einzelradaufhängung	unmittelbar	3	Q	-	1	-	1	-	1	DÄMPFERBEIN/ FEDERBEIN	McPherson-Achse	V2
Vorderachse	Einzelradaufhängung	unmittelbar	4	Q/S	2	-	-	1	-	1	FEDERBEIN MIT 2 STABLENKER	Doppelgelenk Federbeinachse	V3
Vorderachse	Einzelradaufhängung	mittelbar	2	Q	-	1	-	-	-	1	QUERLENKER MIT QUERBLATTFEDER	Blattfederlenker-achse	V4
Vorderachse	Einzelradaufhängung	mittelbar	3	Q	-	2	-	-	-	1	DOPPEL-QUERLENKER	Double Wishbone/ SLA	V5
Vorderachse	Einzelradaufhängung	mittelbar	4	Q/S	2	1	-	-	-	1	MEHRLENKER MIT DREIECKLENKER	Aufgelöste DQL	V6
Vorderachse	Einzelradaufhängung	mittelbar	5	Q/S	4	-	-	-	-	1	MEHRLENKER MIT 4 STABLENKER	Vierlenkerachse	V7
Hinterachse	Starr	unmittelbar	1	L	-	-	-	-	1	-	STARRACHSE MIT BLATTFEDER	Abhängige Blattfederradführung	H1
Hinterachse	Starr	unmittelbar	2	L/S	2	-	-	-	-	-	STARRACHSE MIT SCHRAUBFEDER	Abhängige Radführung	H2
Hinterachse	Starr	unmittelbar	3	S	2	-	-	-	1	-	DEICHSELACHSE	DeDion Achse	H3
Hinterachse	Halbstarr	unmittelbar	1	L	-	-	-	-	1	-	VERBUNDLENKER	Verbund-,Koppel-lenker, Twistbeam	H4
Hinterachse	Halbstarr	unmittelbar	1	L	-	-	-	-	1	-	TORSIONSKURBEL-LENKER	Kurbelarmachse	H5
Hinterachse	Einzelrad	unmittelbar	1	L	-	-	-	-	1	-	LÄNGSLENKER	Längslenkerachse-, Kurbel-Pendelachse	H6
Hinterachse	Einzelrad	unmittelbar	1	S	-	-	-	-	1	-	SCHRÄGLENKER	Schräg/Schraub-/Zentrallenker	H7
Hinterachse	Einzelrad	unmittelbar	2	Q	-	1	-	1	-	-	DÄMPFERBEIN/ FEDERBEIN	McPherson-Achse	H8
Hinterachse	Einzelrad	unmittelbar	3	Q/S	2	-	-	1	-	-	FEDERBEIN MIT 2 STABLENKER	Doppelgelenk- FB, Struts&links	H9
Hinterachse	Einzelrad	mittelbar	3	Q	1	2	-	-	-	-	DOPPEL-QUERLENKER	Double Wishbone Zentral-Lenkerachse	H10
Hinterachse	Einzelrad	mittelbar	4	Q/S	3	1	-	-	-	-	MEHRLENKER MIT DREIECKLENKER	Aufgelöste DQL	H11
Hinterachse	Einzelrad	mittelbar	4	Q/S	3	-	1	-	-	-	MEHRLENKER MIT TRAPEZLENKER	Integrallenkerachse	H12
Hinterachse	Einzelrad	mittelbar	4	L/Q	3	-	-	-	1	-	MEHRLENKER MIT LÄNGSLENKER	Schwertlenkerachse Trailer SLA, E-Link	H13
Hinterachse	Einzelrad	mittelbar	5	Q/S	5	-	-	-	-	-	RAUMLENKER	Fünflenkerachse Multi-Link Axle	H14

LAUFENDE NUMMER	AKTUALLITÄT	ANGETRIEBEN	NICHTANGETRIEBEN	ACHSENGESAMTGEWICHT	LENKROLLRADIUS	STÖRKRAFTHEBEL	RADLASTHEBELARM	BREMSSTÜTZWINKEL	ÜBERSETZUNG	KENNWERTE RADSTELLUNG	KINEMAT. VERÄNDERUNG	ELASTOKIN. VERÄNDERUNG	UNGEFEDERTE MASSEN	MISSBRAUCHSVERHALTEN	SCHWINGUNGSVERHALTEN	SCHRÄG-/LÄNGSFEDERUNG	ANFAHR-/BREMSVERHALTEN	LENKAUFWAND	UNGEFEDERTE MASSEN	AKUSTIK	KAROSSERIEBELASTUNG	MODULARITÄT	RAUMAUSNUTZUNG	MONTAGEKOSTEN	EINZELTEILEKOSTEN	HERSTELLKOSTEN
	ZUGRIFFSTEIL: ALLGEMEIN				KINEMATIK					FAHRVERHALTEN					FAHRKOMFORT						WIRTSCHAFTLICHKEIT					
V1	2	3	3	1	3	2	2	1	5	2	2	2	1	2	1	2	3	3	1	1	4	4	2	1	4	3
V2	5	5	5	4	4	3	3	3	5	4	4	4	5	2	3	4	3	3	5	3	3	4	4	1	5	5
V3	3	5	5	4	5	4	4	3	5	5	5	4	5	2	4	4	4	4	5	4	3	4	4	1	4	4
V4	1	2	5	3	3	3	4	2	3	2	3	2	2	2	2	2	2	3	2	2	4	4	5	2	4	5
V5	3	5	3	2	4	4	4	5	3	4	5	5	5	2	5	5	5	3	4	5	2	1	1	1	1	2
V6	3	5	3	2	5	5	5	4	3	5	5	5	5	2	5	5	5	4	4	5	2	1	2	1	1	2
V7	1	5	3	2	5	5	5	5	3	5	5	5	5	3	5	5	5	5	4	5	2	1	2	1	1	1
H1	1	3	4	4	-	-	-	3	5	1	2	1	1	2	1	1	1	-	1	1	4	4	3	1	4	4
H2	3	4	3	3	-	-	-	3	5	2	2	2	2	2	1	1	1	-	1	1	4	4	3	1	4	4
H3	1	4	2	3	-	-	-	3	5	2	2	3	2	2	1	1	2	-	2	2	4	3	3	2	3	3
H4	5	1	5	5	-	-	-	3	5	4	4	1	4	2	2	1	4	-	4	2	5	1	4	4	5	5
H5	2	1	4	4	-	-	-	3	5	4	3	1	3	2	2	1	3	-	3	2	4	3	3	4	4	4
H6	2	1	3	3	-	-	-	3	5	1	1	1	4	2	4	1	4	-	4	1	2	4	4	4	1	3
H7	2	3	3	2	-	-	-	5	5	2	2	1	4	1	4	1	3	-	4	2	4	4	2	4	4	4
H8	2	3	3	4	-	-	-	4	5	5	4	4	5	2	3	4	3	-	5	3	3	4	4	1	5	4
H9	3	3	3	4	-	-	-	5	5	5	5	4	5	2	4	4	4	-	5	3	3	4	4	1	4	4
H10	4	5	3	2	-	-	-	5	3	4	5	5	5	2	5	5	5	-	4	5	2	1	1	1	1	2
H11	3	4	3	2	-	-	-	5	4	5	5	5	5	2	5	5	5	-	4	5	2	1	2	1	1	2
H12	1	5	1	2	-	-	-	5	3	4	4	4	4	3	4	4	5	-	4	4	2	1	2	1	1	1
H13	3	3	3	3	-	-	-	4	4	4	4	5	4	3	4	5	5	-	4	4	2	1	2	1	2	2
H14	3	5	1	3	-	-	-	5	3	5	5	5	5	2	5	5	5	-	5	5	2	1	1	2	2	2

Tabelle 4-5: Konstruktionskatalog für die Achsen (L = Längs, Q = Quer, S = Schräg, V = Vorderachse, H = Hinterachse, 1 = ungünstig, 5 = sehr günstig) [12]

Wichtig sind die Momentanzentren, durch die die Wankachse des Aufbaus verläuft. Allgemein wird eine nach vorne geneigte Wankachse als stabilisierend beurteilt, die absolute Höhe muss sich an der Lage des Fahrzeugschwerpunkts orientieren. Auch der Nickausgleich ist zwischen den Achsen so abzustimmen, dass der Fahrer beim Bremsen neben einem geringen Nickwinkel möglichst kein Absenken erfährt.
Vertikaldynamisch sind die Eigenfrequenzen leicht unterschiedlich zu wählen, um ausgeprägte Nickeigenschwingungen auszuschließen.
Die gegenseitige Beeinflussung der Vorder- und Hinterachse macht sich hauptsächlich beim Eigenlenkverhalten des Gesamtfahrzeugs bemerkbar (s. Abschnitt 2.5.3).

4.8 Radaufhängungen der Zukunft

4.8.1 Achstypen der letzten 20 Jahren

In den letzten 20 Jahren hat sich die Einsatzhäufigkeit der Achstypen stark geändert. Vergleicht man die Porsche Studie mit den Zulassungszahlen aus 1985 und 1995 (nur in der BRD, bis 1300 kg. Leergewicht) [13] mit den Zulassungszahlen von 2000 [14] und 2005 [15] stellt man folgende Änderungen und Tendenzen fest:

- der Anteil der Allradfahrzeuge ist von 4,5 auf 6,5 % gestiegen,
- der Frontantrieb dominiert deutlich (76,5 %),
- das Federbein vorn ist mit Abstand führend (78 %),
- der Anteil der Doppelquerlenker vorn mit Antrieb sinkt leicht auf 7,5 % im Jahr 2005, nach starken Steigerungen in den Jahren 1985 bis 1995,
- der Anteil der Doppelquerlenker vorn ohne Antrieb sinkt stark auf 9,2 % im Jahr 2005, nach starkem Anstieg in den Jahren 1985 bis 1995,
- der Anteil der Starrachsen sinkt sowohl als Vorderachse (1,4 %) als auch als Hinterachse (22,5 %),
- der Anteil der Halbstarrachsen hinten gehen auf 31 % zurück im Jahr 2005, nach 35 % im Jahr 1995,
- auch Längs- und Schräglenker hinten werden seltener (von 12,6 % im Jahr 2003 auf 10,2 % in 2005),
- der Anteil der Doppelquerlenker hinten steigt von 6,1 % auf 8 %, insbesondere bei nicht angetriebenen Achsen,
- der Anteil der Mehrlenkeraufhängungen hinten bleibt stabil bei 25 % nach starker Steigerung in den Jahren 1985 bis 1995,
- der Anteil des Feder-/Dämpferbeins hinten hat keine Bedeutung mehr (1,2 %).

4.8.2 Häufigkeit der aktuellen Achstypen

Die Vielfalt der Achstypen in den ca. 62 Millionen weltweit produzierten Fahrzeugen bis 3,5 Tonnen in 2005 und ca. 70 Mio. in 2010 ist überschaubarer geworden: **Bild 4-74** zeigt die Anteile für die Vorderachsen und **Bild 4-75** für die Hinterachsen. Hier sieht man, dass vorne nur vier und hinten nur neun Typen über 99 % des Marktes abdecken. In der Zukunft wird die Typenvielfalt weiter abnehmen und sich auf jeweils 2 bis 3 Typen für Vorder- und Hinterachse einschränken. **Bild 4-76** und **Bild 4-77** zeigen deren vorausgesagte Bedeutung für die einzelnen Fahrzeugsegmente.

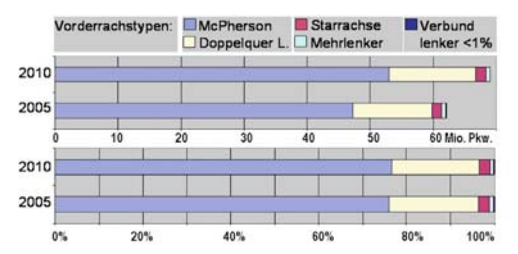


Bild 4-74: Anteile der Vorderachstypen weltweit in den Jahren 2005 und 2010: nur vier Typen werden gebaut, Verbundlenker beschränkt sich nur auf ein Modell

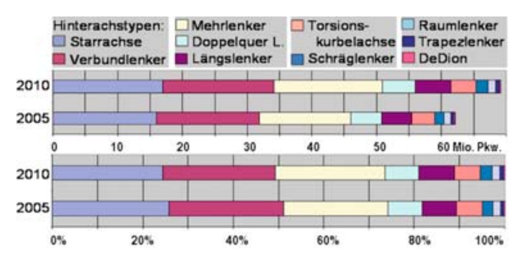


Bild 4-75: Anteile der Hinterachstypen weltweit in den Jahren 2005 und 2010: neun Typen werden gebaut, DeDion-Achse beschränkt sich nur auf ein Modell

4.8.3 Die zukünftigen Achstypen (Tendenzen)

Eine weitere Konzentration auf noch wenige Achstypen ist der Tendenz für die Zukunft [16].
Der steigende Kostendruck, eine potentiell große Käuferschicht mit wenig Kaufkraft, aber auch die Konsolidierung der Anzahl der Automobilhersteller, wird den Zwang zur „Achse aus der Stange" erhöhen. So ist durchaus denkbar, dass ein und dieselbe Achse nicht nur in den unterschiedlichen Marken und Modellen eines Herstellers sondern auch in den Fahrzeugen von unterschiedlichen Herstellern zu finden sein werden.

In Zukunft wird sicherlich auch die Stellung der Achse als Kernkompetenz der OEMs nachlassen und der Kostenanteil der mechanischen Achse am Gesamtfahrzeug zurückgehen.
Für die Vorderachse wird die McPherson-Aufhängung die Volumenmodelle der unteren Klassen voll beherrschen. Sie wird gefolgt von Doppelquerlenker (zum Teil mit aufgelösten unteren Lenkern) mit langer Spindel für Oberklasse und SUVs als angetriebene Achse. Alle anderen Ausführungen werden nur Nischenlösungen bleiben.
Da die Außenabmessungen der Fahrzeuge nicht weiter wachsen werden, wird die McPherson-Aufhängung auch in Zukunft aus Bauraum- und Kostengründen führend bleiben. Vielleicht wird es gelingen, deren Nachteile so zu eliminieren, dass keine Notwendigkeit mehr für die teure Doppelquerlenkeraufhängungen besteht.
Als Hinterachse wird sich für nicht angetriebene Fahrzeuge bis Mittelklasse die Verbundlenkerachse weiterhin behaupten. Für Mittel- und Oberklasse sowie für SUVs werden die Mehrlenkeraufhängungen dominieren. Die Starrachsen sind für Transporter, Light Trucks (Fahrzeuge mit hohen Achslasten) als angetrieben Achse weiterhin sinnvoll. Alle sonstige Arten (Schräglenker, Längslenker, Integrallenker, Federbein usw.) werden weiter an Bedeutung verlieren (**Bild 4-76**, **Bild 4-77**).
Da die Anzahl der Lenker sich nicht weiter erhöhen lässt, ist ein baldiges Ende der kinematischen Weiterentwicklung der Hinterachse vorauszusehen. Die Lenker werden einfacher und kostengünstiger (keine teueren Trapezlenker mehr). Der zukünftige Mehrwert an den Achsen wird eher durch elektronische Systeme erzielt, die das Verhalten der Achse an die jeweilige Fahrsituation anpassen können.
Wenn der Anteil der Hybridfahrzeuge und damit der Radnabenelektromotoren (**Bild 4-78**) stark steigt, ist hier mit ganz neuen, nur auf den Erfordernissen des Hybridantriebs entsprechenden Achstypen zu rechnen. Eins ist jedoch sicher: die Achsen werden sich in den nächsten 20 Jahren nicht wesentlich von den heutigen unterscheiden. Erst danach werden allmählich alle Fahrwerkfunktionen elektrifiziert und möglicherweise in der Felge untergebracht sein.

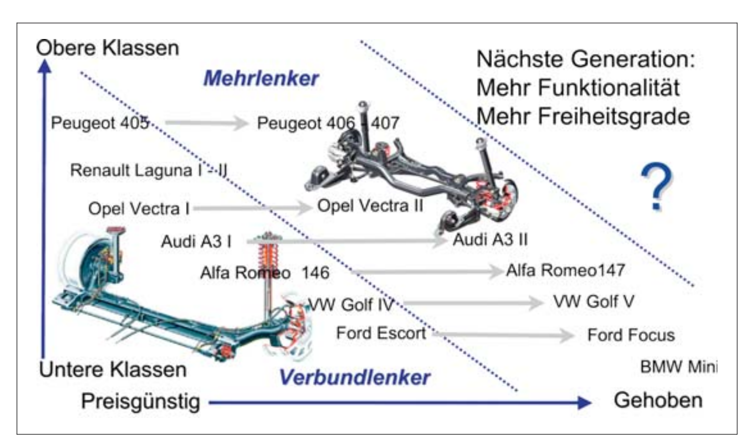


Bild 4-76: Zukunftstendenzen der nicht angetriebenen Hinterachsen für die unteren Fahrzeugsegmente

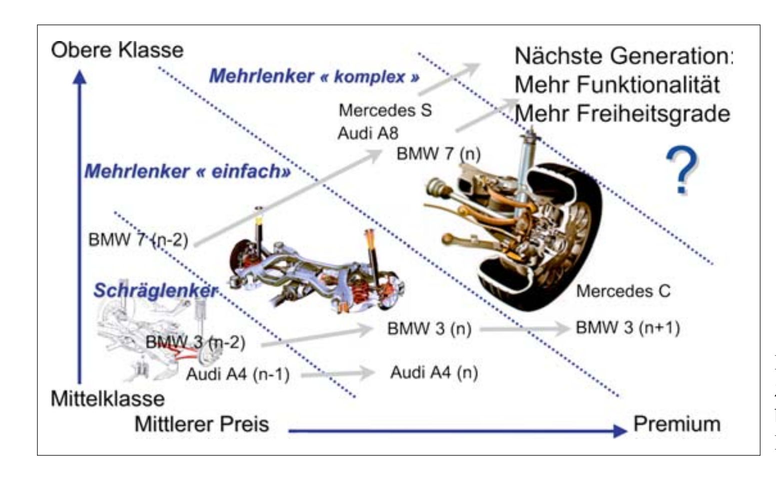


Bild 4-77: Zukunftstendenzen der angetriebenen Hinterachsen für die oberen Fahrzeugsegmente

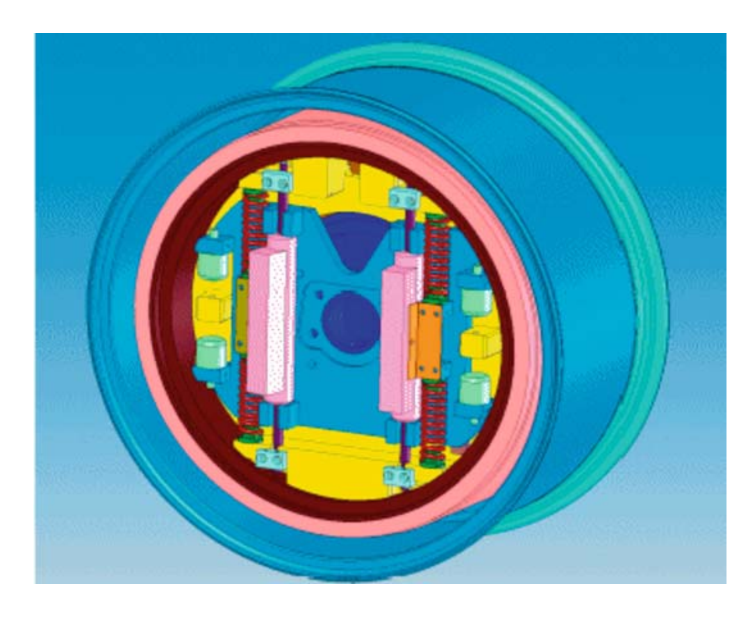


Bild 4-78:
Radnabenmotor mit Schwingungstilger von Bridgestone [17]

Die im **Bild 4-79** gezeigte Vision „eCorner-Modul" von Siemens VDO hat den Radnabenmotor, Federung, Dämpfung, Bremse und sogar die Lenkung in einem sehr engen Raum zusammengefasst. Wenn auch nicht in den nächsten 20 aber sicher in 30 Jahren sind solche Fahrwerke zumindest für elektrisch angetriebene Kleinstfahrzeuge durchaus realistisch (s. auch Abschnitt 8.3 und **Bild 8-8**).

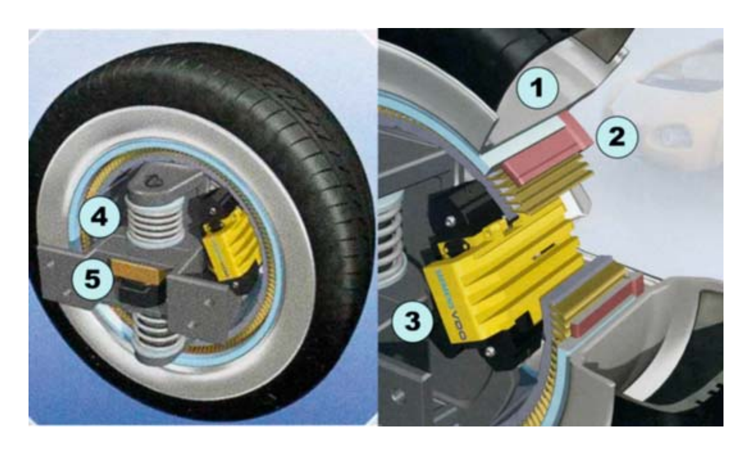


Bild 4-79:
eCorner-Modulkonzept von Siemens VDO [16]:
1 Reifen und Felge,
2 Radnabenmotor,
3 Keilbremse,
4 aktive Feder/Dämpfer
5 Lenkung

Literatur

[1] *Braess, Seifert*: Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2001
[2] *Heißing, B*: Vorlesungsmanuskript, TU München. München, 2005
[3] *Gillespie, T. D.*: Fundamentals of Vehicle Dynamics. Warrendale: SAE International, 1999
[4] *Matschinsky, W.*: Radführungen der Straßenfahrzeuge. Berlin, Heidelberg: Springer, 1998
[5] *Henker, E.*: Fahrwerktechnik. Wiesbaden: Vieweg Verlag, 1993
[6] *Reimpell, J.*: Fahrwerktechnik: Radaufhängungen. Würzburg: Vogel Buchverlag, 1986
[7] Magna Steyr: Dynamische Verbundlenkerachse. Firmenprospekt. Graz, 1994
[8] *Bastow, D.; Howard, G.; Wheitehead, J.*: Car Suspension and Handling, 4th ed. Warrendale: SAE International, 1993
[9] *Arkenbosch; Mom; Neuwied*: Das Auto und sein Fahrwerk, Band 2. Stuttgart: Motorbuch, 1992
[10] *Eppelin, R.*: Offenlegungsschrift DE 101 33 424 A1. Hinterachse eines PKWs mit fünf einzelnen Lenkern. Bundesdruckerei 11.02 102 640/565. 2003

[11] Ultra Light Steel Auto Suspension - Engineering Report Lotus Engineering. Warrendale: SAE International, 2000

[12] *Ersoy, M.*: Konstruktionskataloge für PKW Leichtbauachsen. Haus der Technik, Tagung Fahrwerktechnik in München 6./7. Juni 2000

[13] *Berkefeld, V.; Göhrich, H. J.; Söffge, F.*: Analyse der Achskonzepte für kompakte und leichte Fahrzeuge. In: ATZ 98 (1996), Heft 7/8, S. 415–425

[14] *Fecht, N.*: Fahrwerktechnik für Pkw. Landberg am Lech: Verlag Moderne Industrie, 2004

[15] ZF Lemförder: Marktuntersuchung. Interner Bericht, 2006

[16] *Gott, G. P.*: Segment Trends in All Wheel Drives. 7. Grazer Allradkongress, 2./3. Februar 2006

[17] *Masaki, N.; Tashiro, K.; Iwano, H.; Nagaya, G.*: Entwicklung eines Radnabenantriebssystems. 15. Aachener Kolloquium,, 9./11. Oktober 2006. S. 1699–1710

[18] *Gombert, B.*: X-by-wire im Automobil: von der Electronic Wedge Brake zum eCorner. Chassis.tech, 1./2. März 2007, München